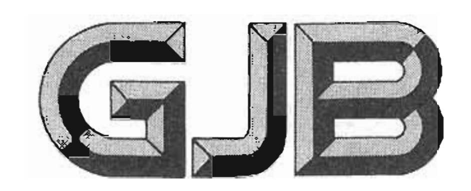


中华人民共和国国家军用标准

FL 0109

GJB 150.20A—2009
代替 GJB 150.20—1986

军用装备实验室环境试验方法 第20部分：炮击振动试验

Laboratory environmental test methods for military materiel—
Part 20: Gunfire vibration test

2009—05—25 发布

2009—08—01 实施

中国人民解放军总装备部 批 准

目　　次

前 言

GJB 150《军用装备实验室环境试验方法》分为28个部分：

a) 第1部分：通用要求；
b) 第2部分：低气压(高度)试验；
c) 第3部分：高温试验；
d) 第4部分：低温试验；
e) 第5部分：温度冲击试验；
f) 第7部分：太阳辐射试验；
g) 第8部分：淋雨试验；
h) 第9部分：湿热试验；
i) 第10部分：霉菌试验；
j) 第11部分：盐雾试验；
k) 第12部分：砂尘试验；
l) 第13部分：爆炸性大气试验；
m) 第14部分：浸渍试验；
n) 第15部分：加速度试验；
o) 第16部分：振动试验；
p) 第17部分：噪声试验；
q) 第18部分：冲击试验；
r) 第20部分：炮击振动试验；
s) 第21部分：风压试验；
t) 第22部分：积冰/冻雨试验；
u) 第23部分：倾斜和摇摆试验；
v) 第24部分：温度－湿度－振动－高度试验；
w) 第25部分：振动－噪声－温度试验；
x) 第26部分：流体污染试验；
y) 第27部分：爆炸分离冲击试验；
z) 第28部分：酸性大气试验；
aa) 第29部分：弹道冲击试验；
bb) 第30部分：舰船冲击试验。

本部分为GJB 150的第20部分，代替GJB 150.20－1986《军用设备环境试验方法 飞机炮振试验》。

本部分与GJB 150.20－1986相比，主要变化如下：

a) 增加了程序I：装备响应实测数据的直接再现；
b) 增加了程序II：统计产生重复脉冲；
c) 增加了程序III：重复脉冲冲击响应谱(SRS)；
d) 增加了附录A：装备实测响应数据的直接再现；
e) 增加了附录B：用统计方法产生重复脉冲—均值(确定性部分)加残余(随机部分)脉冲；
f) 增加了附录C：重复脉冲冲击响应谱(SRS)。

本部分附录A、附录B、附录C、附录D是规范性附录。

本部分由中国人民解放军总装备部电子信息基础部提出。

本部分起草单位：中国航空综合技术研究所、航空工业第六〇一研究所。

本部分主要起草人：徐　明、王光芦、施荣明、朱广荣。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

GJB 150.20—1986。

军用装备实验室环境试验方法
第 20 部分：炮击振动试验

1 范围

本部分规定了军用装备实验室炮击振动试验的目的与应用、剪裁指南、信息要求、试验要求和试验过程的内容。

本部分适用于对军用装备进行炮击振动试验。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本部分的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本部分，但提倡使用本部分的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本部分。

GJB 150.1A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第 1 部分：通用要求

GJB 150.16A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第 16 部分：振动试验

GJB 150.18A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第 18 部分：冲击试验

GJB 150.27－2009　军用装备实验室环境试验方法　第 27 部分：爆炸分离冲击试验

GJB 4239　装备环境工程通用要求

3 目的与应用

3.1 目的

本试验的目的是验证在经受连续小口径炮发射的工作环境中，装备遇到重复冲击/瞬态振动时，保持结构和功能完整性的能力。

3.2 应用

本试验适用于受炮击振动影响的装备。

3.3 限制

本试验不适用于由于阻抗不匹配，很难精确地再现装备炮击环境的实际响应。此外：

a) 本试验不包括大型装备所经历的重复冲击和瞬态振动效应，例如：机身结构系统，其上的各种装备部件可能受到不同的外部激励。对于这种重复冲击和瞬态振动，应根据经验数据设计专门的试验。

b) 本试验不包括在高低温下做炮击振动试验的特殊规定。除另有规定外，一般在大气环境温度下进行试验。但是，本试验对在高低温环境(但不是在炮击压力波辐射温度环境)下设计和实施炮击振动试验有帮助。

c) 本试验不模拟炮击产生的爆炸压力或噪声。

d) 本试验不包括因意外引起试验中断的有关工程指南，例如由于试验设备或其他故障引起的试验中断。一般情况下，若在炮击振动试验期间发生输入中断，要重复实现那个炮击振动试验输入。但是应注意确保由中断炮击振动试验引起的应力不会使随后的试验结果无效，在继续进行试验前，应对所有试验设备记录和中断输入数据进行分析。另外，还应对重新试验的装备进行检查，以确保炮击振动前试验装备的完好性。

4 剪裁指南

4.1 选择试验方法

4.1.1 概述

分析有关技术文件的要求，应用装备(产品)订购过程中实施 GJB 4239 得出的结果，确定装备寿命期内炮击振动环境出现的阶段，根据下列环境效应确定是否需要进行本试验。当确定需要进行本试验，且本试验与其他环境试验使用同一试件时，还需确定本试验与其他试验的先后顺序。

4.1.2 环境效应

4.1.2.1 炮击环境是一个重复冲击或瞬态振动，其产生原因为：

a) 炮口的冲击压力撞击装备表面；

b) 炮的机械运动引起的结构架重复冲击或瞬态振动；

c) a)和 b)的组合。

4.1.2.2 爆炸压力脉冲越靠近装备表面，实测环境越呈现为重复冲击形式，它引起的装备响应具有上升时间短并衰减迅速的特点，同时，在装备总体响应环境上，结构振动起的作用越小。爆炸压力脉冲离装备表面越远，实测环境中越呈现为结构振动或者被介于炮击源和装备之间的结构滤掉的瞬态振动。

4.1.2.3 作用于复杂多模态装备系统的重复冲击或瞬态振动所引起的装备响应中，如下两个频率处的响应较大：

a) 施加在装备上的外部激励环境的强迫频率；

b) 激励期间或激励刚结束后装备固有共振频率。

4.1.2.4 炮击环境对装备的结构和功能完整性产生潜在的不利效应。不利效应随炮的口径、装备与炮的接近程度和炮击环境持续时间的增加而增加。与装备固有频率(随同它的谐波)相一致的炮击速率和炮击环境持续时间，将增大对装备的结构和功能完整性的不利效应。其引起的主要效应：

a) 部件之间、部件接口之间的摩擦力增加或减少；

b) 绝缘电阻下降，磁场和电场强度变化；

c) 电路板故障，电路板损坏，电联接器失效；

d) 永久机械变形；

e) 机械部件断裂；

f) 加速疲劳(低周期疲劳)；

g) 潜在的压电作用；

h) 晶体、陶瓷、环氧树脂或玻璃封装件的破裂、断裂。

4.1.3 选择试验顺序

4.1.3.1 一般要求

见 GJB 150.1A－2009 中的 3.6。

4.1.3.2 特殊要求

在与其他试验共同使用时的顺序取决于试验的类型(如研制、鉴定、耐久试验等)以及试件的本身情况。一般情况下，在试验顺序中先安排炮击振动试验，也可以根据实际情况在振动和冲击试验之后进行炮振试验：

a) 若炮击环境特别严酷，装备的主要结构或功能不失效的概率很小时，则应在试验顺序中首先安排炮击振动试验。确定装备符合炮击振动要求后，再开始更温和的环境试验。

b) 若炮击环境虽然严酷，但装备的主要结构或功能不失效的概率较大时，炮击振动试验可以在振动、温度和冲击试验之后进行，这样在炮击振动试验前可以对试件进行筛选，以暴露综合环境、振动、温度冲击和炮击振动环境故障。

c) 在炮击振动试验量值不如振动试验量值严酷的情况下，炮击振动试验可以从试验顺序中删除。

d) 当同时与其他环境条件一起进行试验(如：振动、温度冲击、湿度、压力等)时，炮击环境可能

影响装备的性能。若装备对综合环境很敏感，试验时应同时施加这些环境。若同时综合这些环境进行试验不可行，并且有必要同其他环境一起估计炮击环境影响，则将单个试件依次暴露在所有相关的环境条件下。一般情况下，在规定的工作条件期间的任何时间都可能发生炮击，所以，应尽可能接近实际的寿命期环境剖面来安排试验顺序。若无法确定，则在振动和冲击试验后立即进行炮击试验。

4.2 选择试验程序

4.2.1 概述

本试验包括下列三个脉冲程序和一个振动程序：

a) 脉冲程序：
   1) 程序I——实测装备响应数据的直接再现；
   2) 程序II——统计生成的重复脉冲；
   3) 程序III——重复脉冲冲击响应谱(SRS)。
b) 振动程序：程序IV——高量级随机振动/正弦加随机振动/窄带随机加随机振动。

4.2.2 选择试验程序考虑的因素

4.2.2.1 概述

根据试验要求，确定使用的试验程序、程序的组合以及程序的顺序。考虑装备寿命期中所有预期的炮击环境，既包括后勤维修后还要炮击的模式也包括工作模式中预期的炮击环境。当选择程序时，应考虑4.2.2.2～4.2.2.6的内容。

4.2.2.2 装备响应

用高量级重复冲击或瞬态振动来表示装备的炮击环境响应的特征。这个环境具有主要频率成分，即炮的发射频率及其谐波，另外，在DC～2000Hz频率上分布着相对较低量级的随机振动能量。炮击环境通常是非稳态的，具有时变特征的均方根(rms)量级，该量级在短时间内明显地超出周围其他诱发环境的振动量级。由于实测响应数据的非稳态特性，按照稳态环境的测量，如自功率谱密度估计，或按照瞬态环境进行测量的冲击响应谱分析都很难解释炮击环境，在这种情况下，可以选择一个脉冲程序；对于温和炮击环境的装备响应特征可以通过稍微增加脉冲特征不易辨认的振动量值来表示，可以用稳态随机振动分析技术来确定这个试验，同时使用程序IV。炮击环境实测数据决定了试验程序的选择，使用该程序的前提是假设知道了装备的动态特性，特别是装备的谐振及炮击速率、它的谐波和这些谐振之间的关系。试验程序选择的不合理会导致装备欠试验或过试验。这些程序预期覆盖了与装备炮击环境有关的整个试验范围。概括如下：

a) 炮击响应严酷且有实测数据的装备使用程序I、II和III；
b) 炮击响应不具有实测数据、炮击响应温和且有实测数据的装备使用程序IV。

4.2.2.3 装备使用目的

按技术文件要求，确定装备在炮击环境前后及期间的运行或功能情况。

4.2.2.4 自然暴露环境

装备对炮击环境的响应在很大程度上取决于炮的口径、炮和装备之间的结构关系。

4.2.2.5 数据要求

要求记录试验环境和试验前、试验期间及试验后验证装备性能的试验数据。

4.2.2.6 程序的顺序

见4.1.2。

4.2.3 各程序的差别

4.2.3.1 程序I

程序I——实测装备响应数据的直接再现。在实验室的振动台上再现实际炮击环境的装备响应，控制波形以得到近似的装备实测炮击响应时间历程，见附录A。

4.2.3.2　程序 II

程序 II——统计生成的重复脉冲——均值(确定性)加残余(随机性)脉冲。该程序根据实际响应数据对模型进行统计拟合，建立实际炮击振动装备响应统计特征模型。在实验室振动台上再现炮击环境响应统计模型，控制波形以得到装备实测炮击环境响应时间历程的统计再现，见附录 B。

4.2.3.3　程序 III

程序 III——重复脉冲冲击响应谱(SRS)。将实测的炮击环境装备响应时间历程分解为单个脉冲进行分析。计算单个脉冲的最大冲击响应谱，用 SRS 来描述装备炮击环境响应的特征。构成一个表示炮击 SRS 特征的响应时间历程，其持续时间等于单个实测装备炮击环境响应脉冲持续时间。以炮击速率重复得到衍生的炮击脉冲，见附录 C。

4.2.3.4　程序 IV

程序 IV——高量级随机振动/正弦加随机振动/窄带随机加随机振动。若实测的装备炮击环境响应时间历程没有显明脉冲特征(一般情况下观察外场实测装备响应时间历程不能确定炮击速率)，或装备离炮口有一定距离，同时只呈现出高量值的结构随机振动，则应使用 GJB 150.16A－2009 中的正弦加随机或窄带随机加随机振动，GJB 150.18A－2009 中程序Ⅷ短时瞬态振动中的指南。在缺少实测数据的情况下，见附录 D。

4.3　确定试验条件

4.3.1　概述

选定本试验和相应程序后(根据装备的技术文件和剪裁过程)，通过确定合适的试验量级、试验条件和选定程序的试验技术来完成剪裁过程。根据这些技术文件、寿命期环境剖面、工作环境文件和选定程序提供的资料进行选择。确定时应考虑 4.3.2～4.3.4 的内容。

4.3.2　总体考虑

用现有的数据或直接从环境数据测量程序得到的数据来确定试验的严酷度。当得不到这些数据时，可在附录 D 中找到试验严酷度和指南。附录 D 仅适用于飞机炮击振动。附录 A～附录 C 中提供的试验指南，主要用于可得到测量数据并且希望精确再现的情况。因为试验不需要对整个环境进行完全模拟，所以试验结果应有支持性的评估。

4.3.3　试验条件

在所有情况下，重现响应数据需要规定合适的接口阻抗。当得不到实测数据时，装备响应应与程序 IV 的规定一致。

4.3.4　试验轴向和炮击次数

试验轴向应与使用环境中的实际状况一致。由炮击压力脉冲引起的装备响应一般包括垂直于压力方向的轴向试验。由结构框架振动引起的装备响应一般包括所有轴向的试验。炮击的次数应与环境寿命周期剖面文件一致。

4.4　试件安装

炮击振动试验试件的安装应和实际使用期间的一样，应特别注意装备安装到平台的细节(见 GJB 150.1A－2009 中的 3.9.1)。炮击响应振动对装备/平台安装细节和输入阻抗很敏感。

4.5　控制

4.5.1　概述

对试件特殊位置上的动态响应进行采样，将动态激励控制在规定的范围内。这些位置可以是装备的安装点上或靠近安装点附近(输入控制试验)，也可以是装备的规定点(响应控制试验)。动态响应可以在单点或几个位置上(多点)进行采样。

a)　对于程序 I、II 和 III，电动振动台或电动液压台在开环波形控制下工作，同时装备响应再现在单点上进行；

b)　对于程序 IV，可以采用单点或多点控制。

4.5.2 控制方案

4.5.2.1 开环

脉冲程序试验不仅是短时的，而且是在对模拟电压输入波形进行适当补偿后以开环模式运行。

4.5.2.2 单点控制

对于程序 IV，单点控制是最基本的要求。选择单点控制时，应特别注意控制点应尽量靠近装备的刚性点，现场测量数据可以从该点得到或可以根据该点进行预测。

4.5.2.3 多点控制

对于程序 IV，当装备远离炮击振动环境以及实测的响应数据表明随机振动环境仅稍超出周边环境时，采用多点控制。多点控制应按规定的控制方案进行，包括对选定控制点自谱密度(ASD)进行平均控制。

4.5.3 控制方法

4.5.3.1 波形控制

程序 I～程序 III 应用的技术将涉及到带有 D/A 和 A/D 接口的计算机，经补偿的模拟输出信号直接驱动振动台。这种控制方式被称为波形控制，采用这种控制方式时，在实验室再现的是时间历程的实际形式(非稳态或稳态)。进行离线信号处理，得到的补偿振动台驱动信号将以数字信号存储，一些现代控制系统为波形控制作了特定的规定。

4.5.3.2 随机振动控制

无论控制器是数字的还是模拟的，都使用闭环控制。由于用于振动程序的回路时间取决于要求的自由度数和整个分析带宽，这些参数对于保证试验允差和控制精度都很重要。

5 信息要求

5.1 试验前需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A－2009 中的 3.8。特殊信息如下：

a) 有关试验夹具、试件、试验夹具/试件组合模态频率和它们与炮击速率之间的关系。包括和试验结构有关的试验模态调查。若做不到，需要对试验结构的模态特性进行支撑性的分析评价，这个过程由专业分析人员来完成。

b) 炮击环境，包括以下任意一种：

  1) 实测数据。在直接波形控制下，作为补偿波形输入给激励系统(程序 I)。

  2) 已进行过统计处理的实测数据。在直接波形控制下，随机产生一个统计处理过的补偿波形输入到激励系统(程序 II)。

  3) 已进行过统计处理的实测数据，以及时间历程的冲击脉冲合成形式(叠加阻尼正弦波、调幅正弦波和其他等)，以匹配 SRS 规定的谱形、谱峰值、谱折点、脉冲持续时间和炮击速率(程序 III)。

  4) 实测高量值随机或瞬态振动(GJB 150.16A－2009 或 GJB 150.18A－2009，程序 VIII)，预测正弦加随机谱，或者预测窄带随机加随机(程序 IV)。

c) 用于输入过程的技术和装备响应数据。

5.2 试验中需要的信息

见 GJB 150.1A－2009 中的 3.11。

5.3 试验后需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A－2009 中的 3.14。特殊信息如下：

a) 每一次暴露的持续时间和暴露次数。

b) 每一次试验后进行功能检测和目视检查结构的完整性。

c) 响应时间历程和对这些时间历程的信息处理。一般包括下列信息：

1) 程序Ⅰ。对实测数据进行分析，包括自谱密度(ASD)估计、平均傅立叶谱(FS)或能量谱密度(ESD)估计，在很短时间历程情况下的 SRS 估计或具有时变谱的某些形式的非平稳处理。
2) 程序Ⅱ。对实测数据进行分析，一般情况下需要建立短时间历程(脉冲)记录总体。包括平均 FS 或 ESD 估计、平均 SRS 估计、在收集的数据总体上具有时变谱的某些形式的非平稳处理。
3) 程序Ⅲ。对实测数据进行分析，一般情况下需要建立短时间历程(脉冲)记录总体。因为输入是重复固定波形，经由 FS、ESD 或 SRS 对单个输入脉冲进行分析就足以确定输入。对于实测装备响应输出，包括平均 FS 或 ESD 估计、平均 SRS 估计、或仅在几个脉冲上计算的单个 SRS 估计。
4) 程序Ⅳ。处理数据以显示确定事件的频谱。一般来说，它是在整个事件持续时间上的 ASD 估计，通过振动台的控制软件来显示。

d) 工作检查结果。
e) 试件/夹具模态分析数据。

6 试验要求

6.1 试验设备

所用的试验设备，包括所有的辅助设备，要能提供规定的炮击装备响应环境，其允差应能满足 6.2 规定的要求。另外，所用的测量传感器、数据记录和数据压缩设备应能测量、记录、分析和显示足够的数据，以编写试验文件和获得任何需要的附加数据。除另有规定外，在标准大气条件下进行规定的炮击振动试验和测量。

6.2 试验控制

6.2.1 概述

所有测量仪器都应按校准程序进行校准。整个试验参数控制链(检查、补偿、伺服、记录等)产生的误差都不应超出 6.2.2～6.2.5 规定的允差的 1/3。基于炮击环境的特性，根据程序处理要求应能按时域、幅值域和频域给出允差。在程序Ⅰ、程序Ⅱ、程序Ⅲ中，假定采集到的试件响应测量数据能代表真实的环境，而不是局部装备结构的函数(例如，不可能控制在 6.2.2～6.2.5 规定的允差范围内的局部共振)。使用的夹具应确保试件在其他轴向的响应不超过试件在试验轴向的响应的 25%。

6.2.2 实测装备响应数据的直接再现

6.2.2.1 时域

单个脉冲的持续时间在由实测炮击速率推出的持续时间的 2.5%范围以内。

6.2.2.2 幅值域

装备时间历程主正、负响应峰值在实测炮击时间历程峰值的±10%范围以内。

6.2.2.3 频域

在至少 90%频率范围内，要求从装备时间历程响应总体计算的平均能量谱密度估计值在实测炮击时间历程总体计算的平均能量谱密度估计值的±3dB 之内。在数据总体不能建立的情况下，若为了减少谱泄漏而对数据作了适当加窗处理，那么应计算时间历程记录的 ASD 估计以进行比较。ASD 分析允差至少在 90%的频率范围内为±3dB。

6.2.3 统计产生重复脉冲——均值(确定性部分)加残余脉冲(随机部分)

6.2.3.1 时域

单个脉冲的持续时间在由实测炮击速率推出的持续时间的 2.5%范围以内。

6.2.3.2 幅值域

装备时间历程主正、负响应峰值在实测炮击时间历程峰值的±10%范围以内。

6.2.3.3 频域

至少在 90%频率范围内，要求从装备时间历程响应总体计算的平均能量谱密度估计值在实测炮击时间历程总体计算的平均能量谱密度估计值的±3dB之内。

6.2.4 重复脉冲冲击响应谱

6.2.4.1 时域

单个脉冲的持续时间在由实测炮击速率推出的持续时间的5%范围以内。

6.2.4.2 幅值域

装备时间历程主正、负响应峰值在实测炮击时间历程峰值的±10%范围以内。

6.2.4.3 频域

在至少 90%频率范围内，确保从单个模拟炮击脉冲引起的装备时间历程响应计算得到的冲击响应谱(SRS)在从现场实测装备炮击响应数据总体上计算得到的均值 SRS 的−1dB 和 3dB 之内。用于 SRS 分析的频率间隔至少为 1/6 倍频程。

6.2.5 高量值随机振动/正弦加随机振动/窄带随机加随机振动

6.2.5.1 时域

确保对应试验轴向的控制点上测得的幅值均方根值(RMS)在预设 RMS 值的±5%以内。同样，确保对应试验轴向的安装点上的 RMS 值最大变化在预设 RMS 值±10%以内。

6.2.5.2 幅值域

确保控制点上测得的随机振动瞬时值的幅值分布为标准正态分布。使用的幅值分布包含的所有情况应一直到 2.7 倍标准差，使大于 3.5 倍标准差的情况发生的概率最低。

6.2.5.3 频域

确保装备响应时间历程的 ASD 分析在现场实测炮击数据或预计的炮击环境 ASD 分析的±3dB 之内。允许在 500Hz 以上局部超差为±6dB，但整个局部超差累计不得超过整个试验频率范围的 5%。使用的最大分析滤波器带宽为 5Hz，用于控制的统计自由度(DOF)数要大于 100。

6.3 试验检测仪器

6.3.1 概述

一般来说，要对加速度进行定量测量以满足规范要求。对测量仪器的幅值量程和频率范围应进行特殊考虑，应定期对所有测量仪器进行检定。可能还需要用于检测试件功能的仪器，在这种情况下，应选择合适的检定标准，并按其要求进行检定。

6.3.2 加速度计

加速度计应满足下列要求：

a) 横向灵敏度应不大于 5%；
b) 在试验要求的峰值加速度幅值的 5%～100%范围内幅值线性度应在 10%之内；
c) 对于所有炮击振动程序，在 5Hz～2000Hz 频率范围内平直频率响应应在±10%之内，测量元件可以为压电式或压阻式；
d) 要得到低于 2Hz 以下响应时，需要用压阻式加速度计进行测量，在 DC～2000Hz 频率范围它的平直频率响应在±10%之内；
e) 测量仪器和它的安装要求应满足动态信号测量要求。

6.3.3 其他测量仪器

任何其他用于采集数据的测量仪器都应符合试验要求，特别是应满足 6.2 的检定和允差要求。

6.3.4 信号调节器

所用的信号调节器应与设备上的仪器要求保持一致，特别是滤波要符合响应时间历程的要求。来自信号调节器的信号在数字化之前应进行抗混滤波。

7 试验过程

7.1 试验准备

7.1.1 试验前准备

试验开始前，根据有关文件确定试验程序、标定负载(若需要)、试件结构、测点布置、炮击量级、炮击持续时间、炮击重复次数等。应特别注意试验确认程序的所有细节。模拟实际使用的安装情况进行固定(例如减振器、紧固扭矩)。安装所有的连接件(例如电缆、管道等)，使施加在试件上的应力和应变与实际使用中遇到的情况相似。某些情况下，在低频处应考虑试件的悬挂状态以避免复杂的试验夹具谐振频率和实测装备炮击响应谐振频率一致。

7.1.2 初始检测

在对激励输入设备进行适当校正后，开始试验之前，在标准大气条件下对试件进行试验前检查，以提供原始的基准数据。检查步骤如下：

a) 对试件进行全面的目视检查，特别注意检查重点区域或认为特别容易损坏的地方，记录检查结果。

b) 在试验夹具上安装试件。

c) 按技术文件对试件进行工作状态检查，同时对响应系统进行简单的测试确保系统工作正常。依据 GJB 150.1A－2009 要求，记录结果。

d) 若证明试件完好，开始进行第一个试验。若试件存在问题，则在解决有关问题之后，重复 a)。

7.2 试验程序

7.2.1 概述

7.2.1.1 7.2.2～7.2.5 提供了在炮击振动环境下收集与试件有关的必要信息的依据。为了分析故障，除了 GJB 150.1A－2009 的指南以外，每个程序都包括有助于评价试验结果的信息。根据 GJB 150.1A－2009 分析试件故障以满足系统规范的要求。

7.2.1.2 试件可以是单个装备，也可以是几个不同类型装备的装配件。

a) 一般要求。除技术文件中另有规定外，通过具备传递规定振动条件能力的刚性夹具将装备连接到振动台上。确保夹具输入给机架、面板/减振器上的振动尽可能准确地模拟使用时传递给装备的振动。需要时，确保受到机架、面板/减振器保护的装备在与夹具刚性连接时也满足适当的试验要求。见 GJB 150.16A－2009 有关外场/试验室阻抗不匹配的有关指南。

b) 外挂。若可行，应使正常支架位置上的安装耳进行三个相互垂直轴向的试验。通过模拟实际工作安装器件的正常安装耳、挂钩和转向支撑将外挂悬挂在结构支架上。使用的试验装置使得外挂/支架/悬挂系统振动的刚体模态(平动和转动)应在 5Hz～20Hz 之间。从振动台到外挂表面上相对刚硬的结构支撑点，通过连杆或其他适当的安装装置来将补偿过的装备响应激励输入给外挂。另一种替代的方法是通过使用正常安装耳和合适的夹具直接将外挂刚性固定在振动台上，应确保安装夹具的刚性，使得它产生的谐振频率尽可能高，从而不影响外挂的响应。对于这两种方法来说，都应尽可能使用发射横梁作为试验装置的一部分。见 GJB 150.16A－2009 中有关外场/试验室阻抗不匹配的进一步指南。

c) 分系统试验。技术文件有规定时，可对装备的分系统进行单独试验。分系统可以经受不同的炮击量级。在这种情况下，应确保技术文件规定每个分系统具体的炮击量级。

d) 试件工作情况。参照技术文件，确定试件是否处于工作状态。因为连续炮击振动试验能引起与实际情况不一致的损坏(例如，减振器与实际不符的发热)，所以应按技术文件的规定通过停止几个周期来中断激励，见附录 A～附录 D。

7.2.2 程序 I——实测装备响应数据的直接再现

程序 I 步骤如下：

a) 按 6.2 和 7.1 规定进行试验准备。

b) 按 4.5 规定选择控制方案和控制点与测量点。
c) 按 7.1 和 7.2.1 规定进行工作状态检查。
d) 按 7.1 和 7.2.1 规定在振动台上安装试件或采用其他一些悬挂方法安装试件。
e) 确定装备炮击加速度响应时所需要的振动台驱动信号的时间历程(见附录 A)。
f) 以输入电压方式提供驱动信号，测量试件在选定控制点/测量点上的加速度响应。
g) 验证试件的响应是否在 6.2.2 规定的允差之内。
h) 按技术文件，提供每次炮击模拟施加周期与中断周期和整个试验持续时间。按技术文件要求进行工作状态检查，并进行功能检测。
i) 沿其他规定的轴向重复 a)～h)。
j) 在所有情况下，记录要求的数据。

7.2.3 程序 II——统计产生重复脉冲——均值(确定性部分)加残余脉冲(随机部分)

程序 II 步骤如下:

a) 计算出装备外场实测响应数据的统计特征。一般说来，这将涉及离线程序，该程序主要用于根据输入给振动台的由测量数据产生的脉冲总体(见附录 B)。
b) 按 6.2 和 7.1 规定进行试验准备。
c) 按 4.5 规定选择控制方案和控制点与测量点。
d) 按 7.1 和 7.2.1 规定进行工作状态检查。
e) 按 7.1 和 7.2.1 规定在振动台上安装试件(或采用其他一些悬挂方法安装试件)。
f) 按要求的装备炮击加速度响应，确定给试件提供需要的振动台驱动信号时间历程(见附录 B)。
g) 以输入电压方式提供驱动信号，测量试件在选定控制点/测量点上的加速度响应。
h) 验证试件的响应是否在 6.2.3 中规定的允差之内。
i) 按技术文件，提供每次炮击模拟施加周期与中断周期和整个试验持续时间。按技术文件要求进行工作状态检查，并进行功能检测。
j) 沿其他规定的轴向重复 a)～i)。
k) 在所有情况下，记录要求的数据。

7.2.4 程序 III——重复脉冲冲击响应谱(SRS)

程序 III 步骤如下:

a) 将外场实测数据分解为单个脉冲，在每个脉冲上采用阻尼系数为 5%、2%、1%和 0.5%(Q=10、25、50 和 100)来计算冲击响应谱（见附录 C)。
b) 根据 a)确定的 SRS 估计值，比较每一个阻尼系数下的均值冲击谱，确定优势频率，获得持续时间的估计值或者获得单个优势频率的半周期的有关信息。可以通过使用单个选定的脉冲来代替使用每个阻尼系数下的均值 SRS(参见附录 C)。
c) 对复杂瞬态持续时间而言，用 b)的结果表示 SRS 时间历程的特征，同时按 b)选择平均的 SRS 或单个脉冲来表示幅值特征。
d) 按 6.2 和 7.1 规定进行预处理。
e) 按 4.5 规定选择控制方案和控制点与测量点。
f) 按 7.1 和 7.2.1 规定进行工作状态检查。
g) 按 7.1 和 7.2.1 规定在振动台上安装试件(或采用其他一些悬挂方法安装试件)。
h) 在对振动台驱动信号进行适当校正后，以炮击速率将瞬态 SRS 输入给振动台控制系统，同时测量试件在选定控制点/测量点上的加速度响应。
i) 验证试件的响应是否在 6.2.4 中规定的允差之内。
j) 按技术文件，提供每次炮击模拟施加周期与中断周期和整个试验持续时间。按技术文件要求进行工作状态检查，并进行性能检测。

k) 沿其他规定的轴向重复 a)～j)。

l) 在所有情况下，记录要求的数据。

7.2.5 程序Ⅳ——高量值随机振动/正弦加随机振动/窄带随机加随机振动

程序Ⅳ步骤如下：

a) 对整个实测炮击数据计算自谱密度，计算时的分析频率带宽至少为 2000Hz，分析处理带宽不应超过 5Hz，或者计算组合离散正弦分量及 2000Hz 的自谱密度的估计（见附录 D）。

b) 根据下列指南，生成相当于高量值时域加窗随机振动试验谱、正弦加随机振动试验谱和窄带随机加随机振动试验谱的时间历程：

1) 若 ASD 谱估计值是从装备外场实测响应数据计算得到，并且呈现出连续谱形式，在其谐波频率上不存在离散的分量，则首先产生一个有相同谱内容的高量值随机振动时间历程，然后通过施加适当的时域矩形窗串进行加窗处理，生成一个瞬态振动时间历程，加窗/不加窗的持续时间由使用中炮击时间表来确定。

2) 若 ASD 谱估计值是从装备外场实测响应数据计算得到，并且呈现出连续谱形式，在其谐波频率上存在离散分量，则根据实际使用情况先产生一个有相同谱内容的正弦加随机或窄带随机加随机振动时间历程。若实际预期使用的是一门具有固定发射速率的炮，则选择正弦加随机试验方法。若实际预期使用的是一门具有可变发射速率的炮或几门具有固定发射速率（或发射速率可变）的炮，则选择窄带随机加随机试验方法。对于窄带随机加随机试验参数的选择（例如：扫描速率和扫描带宽）要由有经验的分析人员按实际使用中炮击时间的要求去判断。试验不应受软件试验能力所限制。按使用中的炮击时间表来选择炮击施加/停止持续时间。

3) 若对装备响应预计的 ASD 谱估计值呈现出连续谱形式，同时在其谐波频率上存在离散分量，则根据实际使用知识和分析人员经验产生一个有相同谱内容的正弦加随机振动或窄带随机加随机振动时间历程。总之，窄带随机加随机将使用于具有不同固定发射速率的单发炮的其他火炮结构。按使用中的炮击时间表来确定炮击施加/停止持续时间。

c) 按 6.2 和 7.1 规定进行预处理。

d) 按 4.5 规定选择控制方案和控制点与测量点。

e) 按 7.1 和 7.2.1 规定进行工作状态检查。

f) 按 7.1 和 7.2.1 规定在振动台上安装试件（或采用其他一些悬挂方法安装试件）。

g) 通过振动台控制系统输入振动谱型，测量试件在选定控制点/测量点上的加速度响应。

h) 验证试件的响应是否在 6.2.5 规定的允差之内。

i) 按技术文件，提供每次炮击模拟施加周期与中断周期和整个试验持续时间。按技术文件要求进行工作状态检查，并进行功能检测。

j) 沿其他规定的轴向重复 a)～i)。

k) 在所有情况下，记录要求的数据。

附　录　A
（规范性附录）
装备实测响应数据的直接再现

A.1　范围

A.1.1　目的

本附录提供了振动台上采用开环波形控制方式直接再现装备实测响应数据的指南和依据。

A.1.2　应用

本技术应用于再现非稳态和瞬态振动的单点装备响应。

A.2　推导过程

A.2.1　环境确定的基本考虑因素

假设已进行了使用试验，并用适当的测试设备对装备上预先选好的点进行了测量。所选测量点上的局部共振最小。通过观察装备上的随机振动数据，在进行使用试验前要确定测量位置。在处理过程中，外场测量数据应是直流耦合(不是高通滤波)的，同时使用恰当的抗混滤波技术以10倍于最高试验频率的频率进行采样。检查实测数据时间历程，以确定是否存在任何削波现象或者加速度计性能异常现象(如零位漂移)。若加速度计测量时有异常现象，按鉴定爆炸冲击数据时使用的程序仔细检查潜在不可靠的加速度时间历程，例如，进行时间历程综合以检查速度和位移特性、计算样本概率密度函数(PDF)估计值。(更进一步的详细说明见GJB 150.27—2009)若加速度计并没有异常现象，则就在很低的频率(例如：1Hz)上对测量数据进行高通滤波，同时将数据存入一个数字文件中。

A.2.2　试件安装

将装有专用测试仪器的试件安装在试验室振动夹具上，然后将其安装在电动振动台上，试件试验的安装状态应与试件实际使用时的状态一样。

A.2.3　建立装备炮击振动响应的数字文件

炮击环境再现过程的第一步是对实测数据进行数字化，获得装备响应幅值时间历程(见图A.1)。为了得到良好的时间历程分辨率，采用2000Hz、48dB/Oct的线性相位抗混滤波器和20480点/s的采样率对模拟数据进行数字化处理。

A.2.4　振动台驱动信号/试件倒频响函数的特征

使试件经受低量值的正弦扫频激励，得出振动台驱动信号和试件加速度响应之间的逆频响函数。在PC机上通过使用20480点/s的采样率和2048点大小的块来产生正弦扫频激励，每块的持续时间大约0.1s。正弦扫频输入的起始频率为10Hz，终止频率为2000Hz。通过PC机的D/A接口将正弦扫频激励输入到振动台的功率放大器中。图A.2为振动台正弦扫频输入信号和试件响应信号。随后，通过使用PC机的A/D接口采用20480点/s的采样率和2048点大小的块将振动台正弦扫频输入信号和试件的响应信号数字化。按式(A.1)估计逆频响函数($IH(f)$)：

$$IH(f)=\frac{E_{dd}(f)}{E_{dx}(f)} \qquad \text{(A.1)}$$

式中：

E_{dd} ——振动台正弦扫频驱动信号$d(t)$的输入能量谱密度，(V^2-s)/Hz；

E_{dx} ——试件的加速度响应$x(t)$和正弦扫频振动台驱动信号$d(t)$之间的能量互谱密度，(V-g-s)/Hz。

图A.3为逆频响函数的模和相位。为了减少$IH(f)$中噪声，应对3个或更多个的$IH(f)$估计值进行平均。在试验室条件下，信噪比通常是很高的，因此在估计时不必要通过平均来减少噪声量级。

A.2.5 截断逆频响函数

信号处理软件是在超采样频率(奈奎斯特频率)范围上计算逆频响函数的，它远远超出感兴趣的频率范围，因此需对逆频响函数使用截断函数。截断函数删除了感兴趣频带(10Hz～2000Hz)以外的不需要的频率内容(噪声)。在2000Hz以上经过大约200Hz的带宽，模逐渐减少到0。但是，在2000Hz以上相位保持不变。经截断后的逆频响函数的模和相位见图A.4。

A.2.6 计算脉冲响应函数

对逆频响函数 $IH(f)$ 进行逆傅立叶变换来产生脉冲响应函数，见图A.5。

A.2.7 计算校正振动台驱动信号

用脉冲响应函数(图A.5，单位为V/(g-s))与装备实测炮击响应(见图A.1，单位为g)进行卷积来产生振动台电压驱动信号。也可以在频域中将傅立叶变换相乘，即将 $IH(f)$ 乘以未进行加窗处理的时间历程块的傅立叶变换，并且对其乘积进行逆傅立叶变换来完成，这个过程中使用了重叠—储存或重叠与加入程序。图A.6的上半部分为经过校正的振动台电压驱动信号。

A.2.8 再现装备炮击响应

用PC机的D/A接口将经过校正的振动台电压驱动信号输入给振动台功率放大器，从而在试件上获得希望的装备炮击响应。振动台的波形控制方式是开环工作方式。对短时间的非稳态记录和瞬态振动，这是一种很好的控制方式。图A.6是经过校正的振动台电压驱动信号以及装备响应。图A.7是装备工作实测炮击响应同试验室模拟的试件炮击响应的比较。

A.2.9 结论

对于相对简单的动态装备上的单点响应测量，直接再现装备工作实测响应的方法可能是一种"最优"的方法。该方法的主要优点是可以再现非稳态或瞬态振动的装备响应。它的主要缺点是没有一个明确的方法来统计处理装备实测响应数据，以确保试验的保守程度。但是，可以使用如下方法来增加试验的保守性。进行试验操作时，先减少振动台功放的增益量，然后再逐步增大功放的增益(假设试件响应是功率放大器增益的线性函数)。

A.3 推荐的程序

A.3.1 推荐的程序

对于相对简单的动态装备上的单点装备响应，当装备在炮击环境下工作时，保持功能和结构完整性非常重要，就使用本程序。

A.3.2 不确定因素

本程序中唯一显著的不确定性因素是，不能确定实测环境和实际使用环境的差异有多少。一般不可能得到所有使用条件下的实测环境。

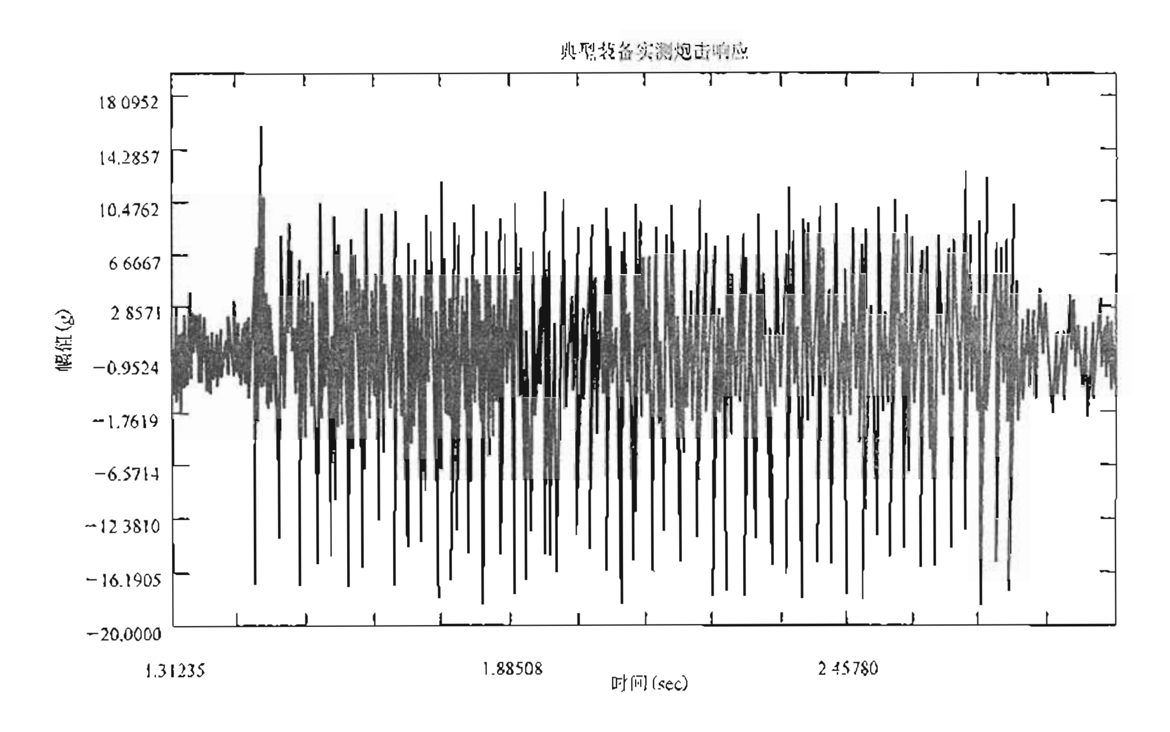


图 A.1 数字化测量数据

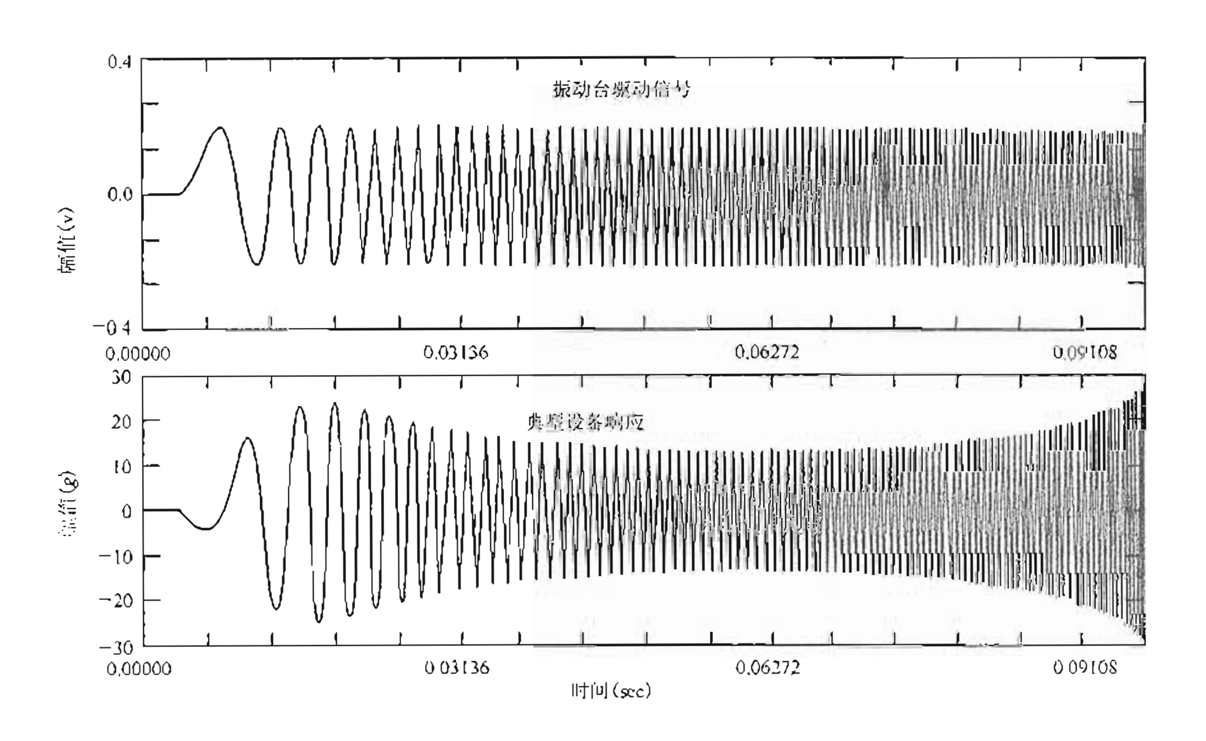


图 A.2 输入给振动台的正弦扫频振动及引起的试件响应

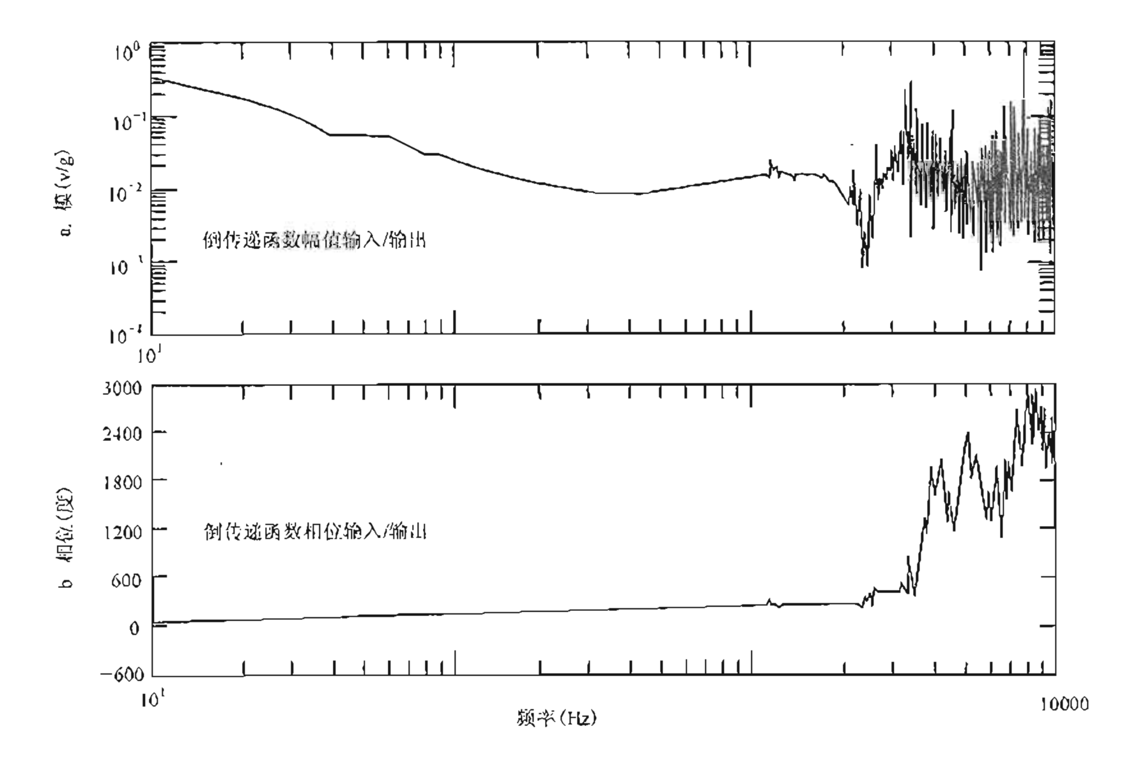


图 A.3 逆频响函数的模与相位

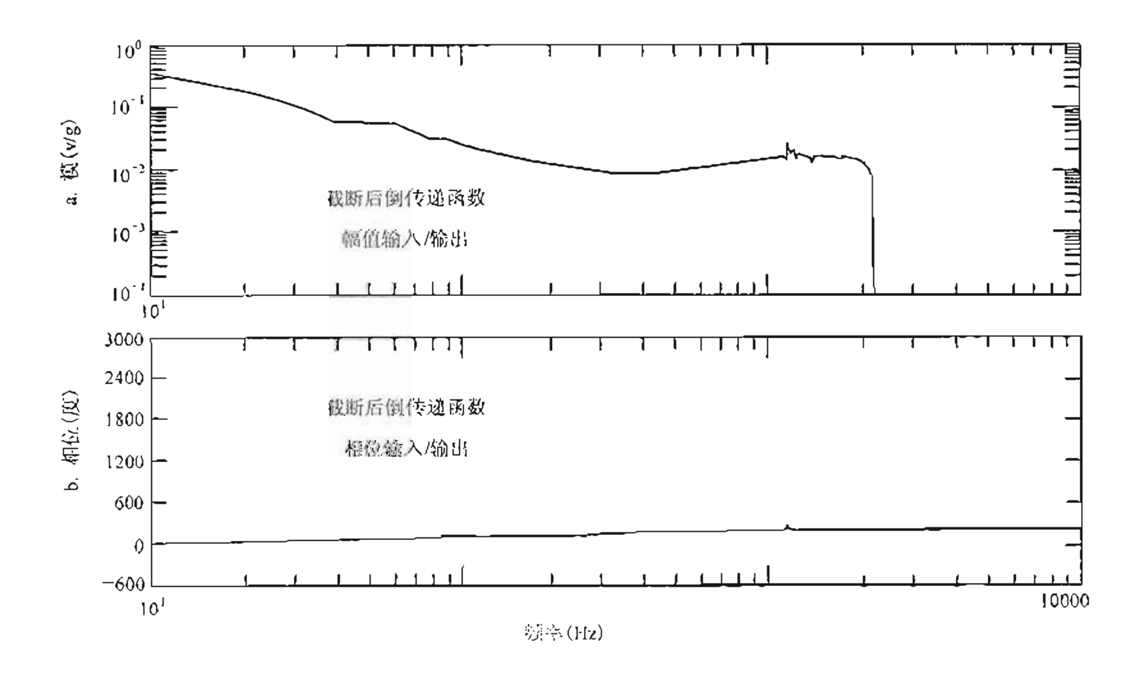


图 A.4 经截断后逆频响函数的模与相位

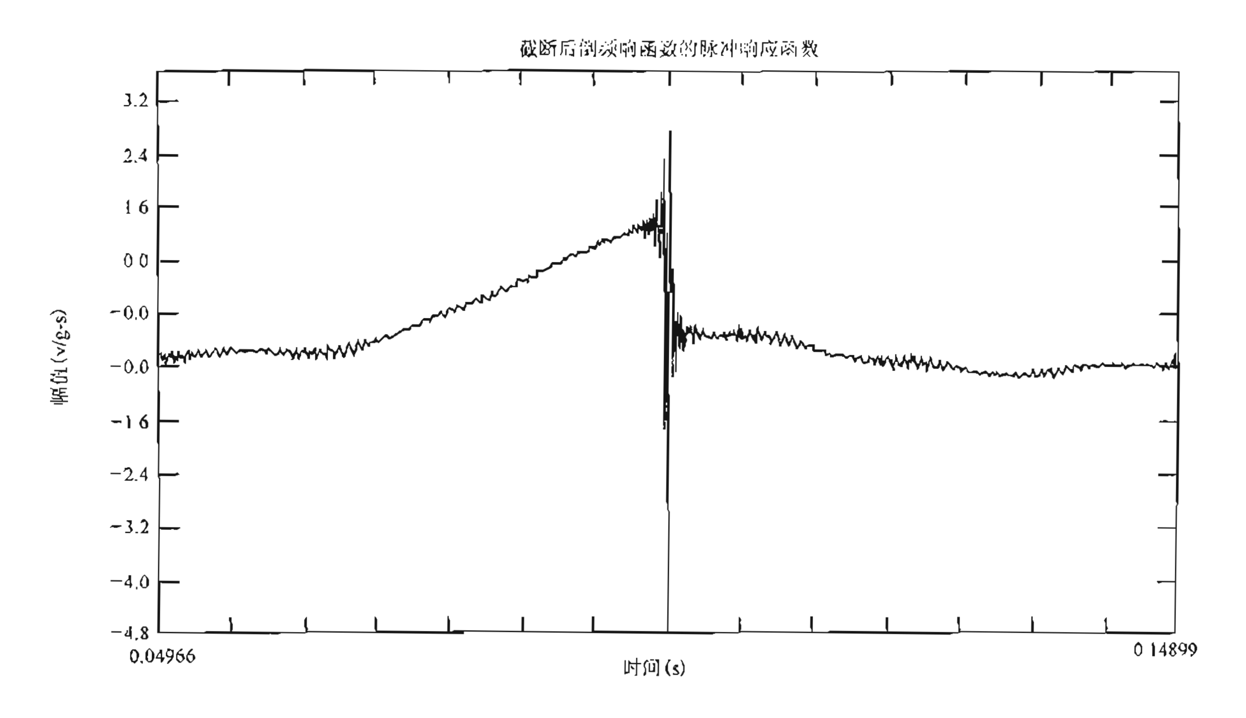


图 A.5 脉冲响应函数

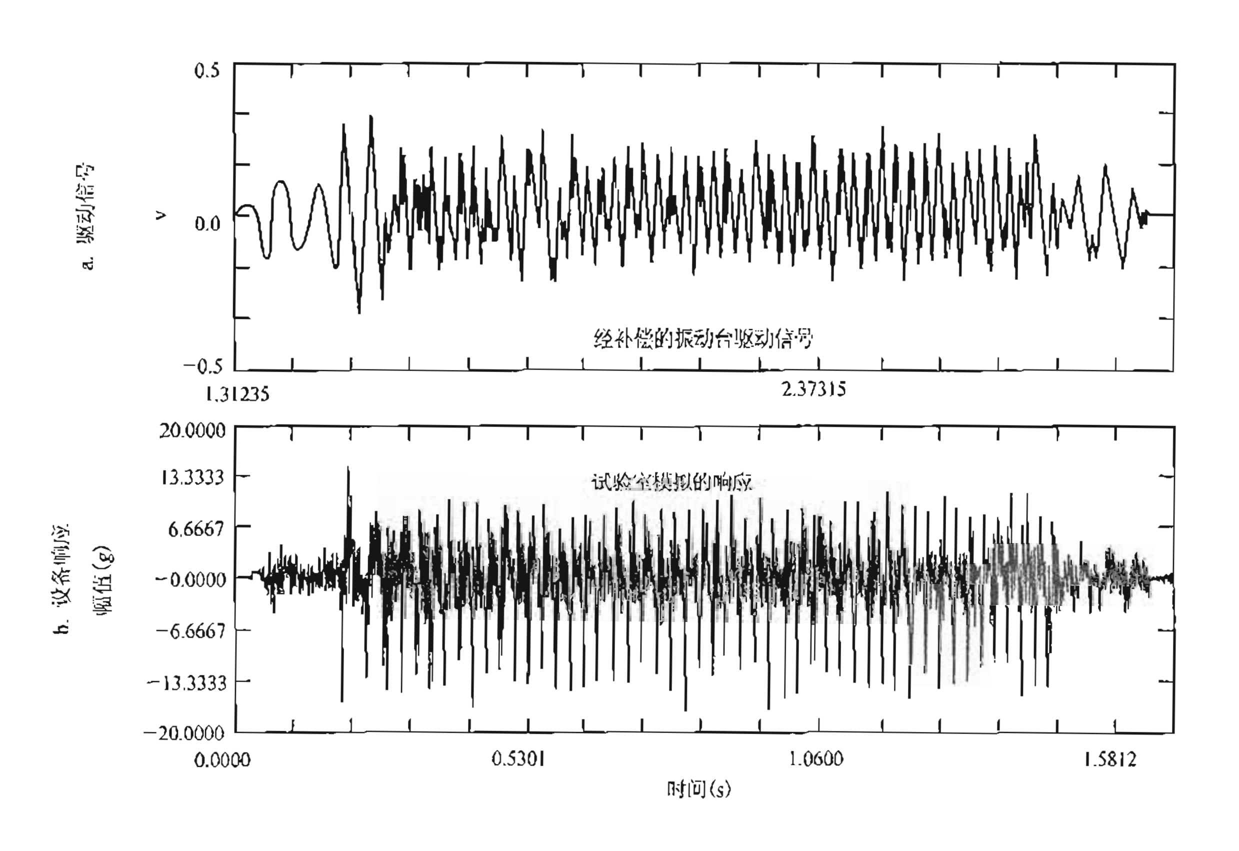


图 A.6 校正过的振动台驱动信号及其引起的装备响应

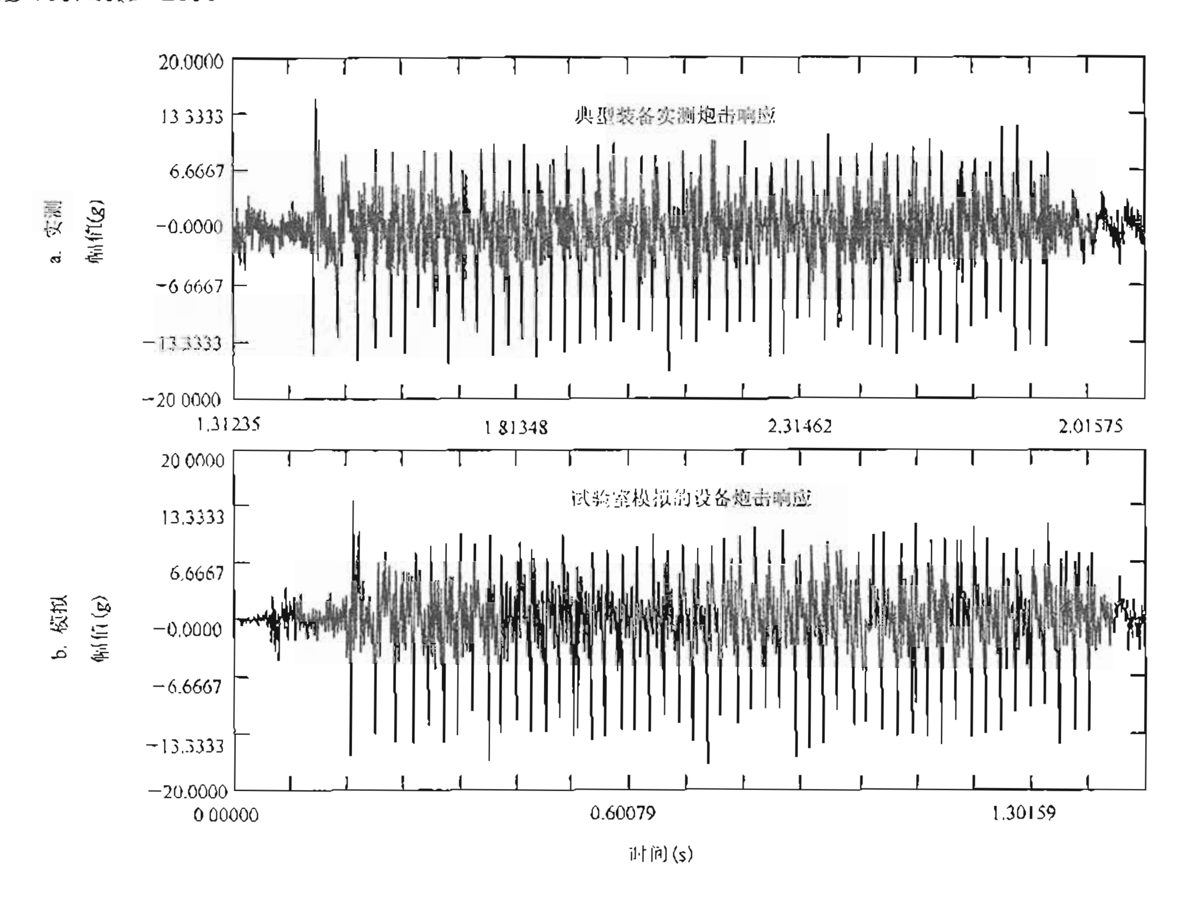


图 A.7 装备实测炮击响应与试验室模拟的装备炮击响应的对比

附　录　B
（规范性附录）
用统计方法产生重复脉冲—
均值（确定性部分）加残余脉冲（随机部分）

B.1　范围

B.1.1　目的

本附录提供了给定样本函数（可以用它们来产生描述时变过程的总体统计特征）下时变随机过程的模拟技术。

B.1.2　应用

本方法用于从随机过程的单个样本函数来推导与之相对应的时变随机过程。该样本函数代表了单个炮击信号的特征。

B.2　推导过程

B.2.1　附录 B 中的符号

$E[\ ]$ ——括号中量的期望值；

N，N_p ——总体脉冲数目；

$P(x,\ t)$ ——非平稳随机过程的概率分布函数；

$R_{xx}(\tau,\ t)$——非平稳随机过程的自相关函数；

$\{x_i(t)\}$ ——随机过程；

$x_i(t)$ —— 随机过程第 i 个样本函数；

$X_T(f)$ —— $x(t)$在有限的时间间隔 T 上的傅里叶变换；

$\mu_x(t)$ ——时变均值的真值；

$\hat{\mu}_x(t)$—— 时变均值的估计值；

$\sigma_x(t)$ ——时变标准差的真值；

$\hat{\sigma}_x(t)$ ——时变标准差的估计值；

$\Psi_x^2(t)$ ——时变均方值的真值；

$\hat{\Psi}_x^2(t)$——时变均方值的估计值；

T_p ——平稳样本记录周期，s；

$f_1=1/T_p$ ——平稳样本记录的基频，Hz；

T ——采样时间间隔；

$f_c=1/(2T)$ ——奈奎斯特截止频率。

B.2.2　引言

术语“总体”是指在规定时间间隔上的样本时间历程记录的集合。在非平稳环境情况下，能完整描述该环境的是时间与幅值函数的概率分布函数 $P(x,\ t)$的统计估计，或时变自相关函数 $R(\tau,\ t)$的统计估计。但是一般情况下，很难得到 $P(x,\ t)$和 $R(\tau,\ t)$。对于实际情况，可以估计实测响应数据的时变均值、时变标准差、时变均方根、总平均能量谱密度和时变自相关等统计量，来分析样本总体的非平稳随机过程特征。

B.2.3　假设

为了确定本附录中程序是否适用于具体的测量/试验目的，特作以下基本假设：

a)　在实际使用环境中从受试装备“硬点”上获取实测装备响应数据。所谓“硬点”是指该位置所特有的局部装备响应（包括结构非线性）在装备总响应中不占优势，或该位置的装备响应代表了

装备总的响应。

b) 装备使用时测量到的响应样本时间历程具有时变特性，并且以与炮击速率相关的时间间隔为周期不断重复。

c) 装备使用时测得的响应样本时间历程分解成短时间历程记录(或脉冲)的总体，使每个短时间历程在相同的时间间隔上有着类似的时变特征。

d) 试件在试验时的安装状态与其在实际使用中的安装状态相同。

e) 采用附录 A 中的程序来确定电动振动台或电液振动台的试验频率响应函数。

f) 用试验频率响应函数来模拟幅值时间历程，可通过以下两种方法完成：

1) 能量谱密度函数方程，对每个短时间历程或脉冲与系统脉冲响应函数进行卷积，再将这些脉冲连成一个长的电压时间历程输给 D/A 接口。

2) 一个长的时间历程卷积，首先输出一个长的时间历程，然后将其与系统脉冲响应函数进行卷积，再将卷积得到的驱动信号输入给 D/A 接口。这两种技术都是以开环方式运行。对于该运行方式，建议补偿波形的长度不超过 5s。

B.2.4 对装备响应时变随机过程描述的建模和统计

时变随机过程建模的一个非常通用的模型是“积模型”，它假定随机过程的时变特征独立于它的频率特征。可以用“积模型”来分析装备炮击环境响应。该模型要用到实测响应环境的总体特性的基本统计量如下：

a) 时变均值；

b) 时变标准差；

c) 时变均方根；

d) 平均能量谱密度函数。

模拟的统计误差可用 a)～d) 的误差来表达。

本文中的“积模型”的定义如下：$u(t)$ 为平稳随机过程 $\{u(t)\}$ 的一个样本时间历程，$a_1(t)$ 与 $a_2(t)$ 都是确定性时间历程，则一个通用时变随机过程 $\{x(t)\}$ 的模型为式(B.1)：

$$x(t)=a_1(t)+[a_2(t)u(t)]_f \qquad \text{(B.1)}$$

式中：

$a_1(t)$——使用环境时变总体均值估计确定的确定性时间历程；

$a_2(t)$——使用环境的时变总体标准差估计确定的确定性时间历程。

当从使用环境总体去掉 $a_1(t)$ 后，$a_2(t)$ 就形成了(在时域上)使用环境总体残余部分的均方根量级。括号后的“f”说明残余信息是频率内容的函数，它代表了在 4 个离散等长度的时间间隔上的时变频率内容。在该模型中 $a_1(t)$－总体的时变均值(即“信号”)；$[a_2(t)u(t)]_f$—残余部分(即“噪声”)。若在时变随机过程中，确定性的时变均值(即“信号”)占有非常大的优势，也就是说 $a_1(t)$ 的幅值远大于 $[a_2(t)u(t)]_f$ 的幅值，就应该尽量减少时变均值、标准差和均方根的误差。频率内容也应该很容易再现。根据实测数据的总体，从原始总体每个样本时间历程中减去时变均值，来构造残余总体，见式(B.2)：

$$\{r(t)\}=\{x(t)\}-\hat{\mu}_x(t) \qquad \text{(B.2)}$$

这个残余总体有以下两个特性：

a) $\{r(t)\}$ 的时变均值为 0；

b) $\{r(t)\}$ 的时变均方根是总体 $\{x(t)\}$ 的时变标准差。

判断模拟有效性的时域准则是时变均值、时变标准差和时变均方根等估计量的方差。这些估计量和它们方差的表达式如式(B.3)～式(B.8)。对具有 N 个样本、每个样本的持续时间为 T_p 的总体，它的时变均值的无偏估计如式(B.3)：

$$\hat{\mu}_x(t)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i(t) \quad \cdots\cdots (B.3)$$

该估计量的方差如式(B.4)：

$$E\left[(\hat{\mu}_x(t)-\mu_x(t))^2\right] \quad 0\leqslant t\leqslant T_p \quad \cdots\cdots (B.4)$$

式中：

$\mu_x(t)$——该非平稳过程时变均值的真值。

总体{$x(t)$}的时变标准差的无偏估计如式(B.5)：

$$\hat{\sigma}_x(t)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i(t)-\hat{\mu}_x(t))^2}{N-1}} \quad \cdots\cdots (B.5)$$

估计量的方差理论上如式(B.6)：

$$E\left[(\hat{\sigma}_x(t)-\sigma_x(t))^2\right] \quad 0\leqslant t\leqslant T_p \quad \cdots\cdots (B.6)$$

式中 $\sigma_x(t)$ 为非平稳过程时变标准差的真值。

总体{$x(t)$}的时变均方值的无偏估计如式(B.7)：

$$\hat{\Psi}_x^2(t)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i^2(t) \quad 0\leqslant t\leqslant T_p \quad \cdots\cdots (B.7)$$

该估计的方差如式(B.8)：

$$E\left[(\hat{\Psi}_x^2(t)-\Psi_x^2(t))^2\right] \quad 0\leqslant t\leqslant T_p \quad \cdots\cdots (B.8)$$

式中：

$\Psi_x^2(t)$——该非平稳过程时变均方值的真值。

在频域，总体{$x(t)$}的平均能量谱密度函数如式(B.9)：

$$\hat{E}_{xx}(f)=2E\left[|X_{T_p}(f)|^2\right] \quad 0<f<f_c \quad \cdots\cdots (B.9)$$

该估计的方差理论上如式(B.10)：

$$V[\hat{E}_{xx}(f)]=E\left[(\hat{E}_{xx}(f)-E_{xx}(f))^2\right] \quad 0<f<f_c \quad \cdots\cdots (B.10)$$

$\hat{E}_{xx}(f)$ 估计中包括与傅立叶分析带宽有关的偏差。这里假定通过正确选择傅立叶分析带宽可以使总偏差最小“真”值是未知的，但是可以被认为是要处理的实测的装备响应。

B.2.5 模型对实测装备响应的具体应用

图 B.1 a)为 30mm 火炮炮击过程中装备的实测响应数据，其中包含 50 个脉冲(N_p=50)。该火炮的炮击速率约为 40 发/s，整个过程持续约 1.25s。其采样频率为 20480，抗混滤波器截止频率设在 2kHz。将该实测数据分解成 50 个脉冲，每个脉冲约 25ms 长，把这 50 个脉冲作为一个总体。图 B.2 a)为总体中的一个典型脉冲(第 37 脉冲)，图 B.3 a)为其残余脉冲。对于该总体，图 B.4 a)为按等式(B.3)计算得到的均值估计。图 B.5 a)为按等式(B.5)计算得到的 N_p 个记录的总体标准差估计，它也是残余总体的均方根图。图 B.6 a)为总体均方根。按等式(B.4)将总体每个成员减去均值就得到残余总体。该残余总体具有零均值、非零均方根值，其非零均方根值等于原始样本的标准差。由上述各图可知，该实测总体具有时变均值、时变均方值和时变频率等特性，高频位于记录的开始部分。分别计算原始实测总体与残余实测总体的能量谱密度，从中可以看出原始总体删去时变均值后的效应，以及两个总体不同的频率特性。图 B.7 a)将这两个 ESD 估计重叠在一起。对 ESD 进行估计时，傅立叶分析滤波器带宽为 5Hz。对原始样本时频特性更详细的的分析如图 B.8 a)中 T1～T4 所示。在该分析中，脉冲长度被分为 4 个相等的时间段，每个为 6.25ms，保留 20Hz 的滤波器带宽对每一段计算其平均 ESD。估计值在整个总体上平均，

没有使用时域尖而细的地方。当将4个谱互相重叠在一幅图形中时，可以很清楚地看到，原始总体和残余总体(图B.9 a))的时频特征。根据等式(B.1)列出的模型进行模拟，以及对时变均值、标准差、均方根和残余与总体能量谱密度估计进行的误差估计。图B.10 a)和图B.10 b)分别为估计的确定性函数 $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$。图B.11 a)显示在对残余部分进行滤波前的残余部分信息，图B.11 b)显示滤波后的残余部分信息。基于傅立叶变换(FFT和逆FFT)的处理方法被用来确定模拟试验总体，为了模拟总体的时频率特性，模拟时在时间上分段会导致时间边界上一些较小的不连续性，在频域上分割时，也可能导致频域上的时变特性一些较小的不连续性。图B.1 b)为一个模拟的总体，它具有 N_p 个脉冲。图B.2 b)与图B.3 b)分别为该模拟总体的一个典型脉冲(第37脉冲)及其残余部分。图B.4 b)为它的均值，而图B.5 b)为它的标准差，图B.6 b)为它的均方根。图B.7～图B.9为与实测信息对应的模拟ESD信息。图B.12为在样本量为10、25与50个脉冲时的最大的与中间的时变均值根方差估计。它代表了在每个时间点作为三个样本尺寸模拟结果的可预计的误差(差异)。时变标准差与时变均方根的对应信息分别提供在图B.13与图B.14中。一般情况下，对于 $N_p=50$ 样本时间历程的总体，最大均方根差小于2.5g，中间均方根差低于0.75g。

B.2.6　实现

用一台大型计算机或个人计算机(PC)对数据进行预处理，来模拟装备响应信号。在将模拟电压信号输给振动台前，应按附录A中的程序对其数字波形进行适当补偿。

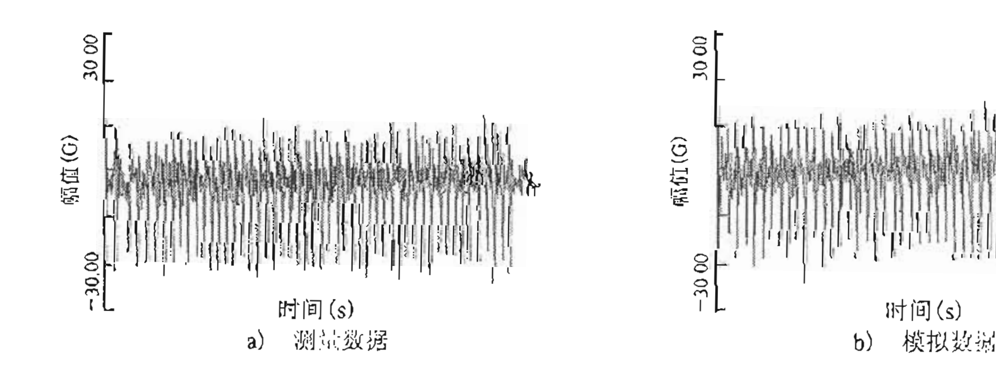
B.2.7　推荐的程序

B.2.7.1　推荐的程序

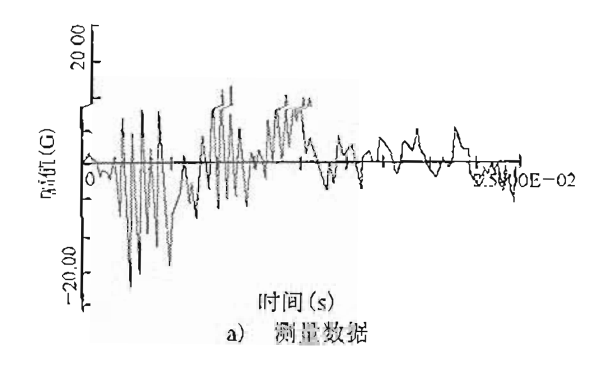
对于相对简单的动态装备上的单点装备响应，当装备在炮击环境下工作时，保持功能和结构完整性非常重要，就使用本程序。

B.2.7.2　不确定因素

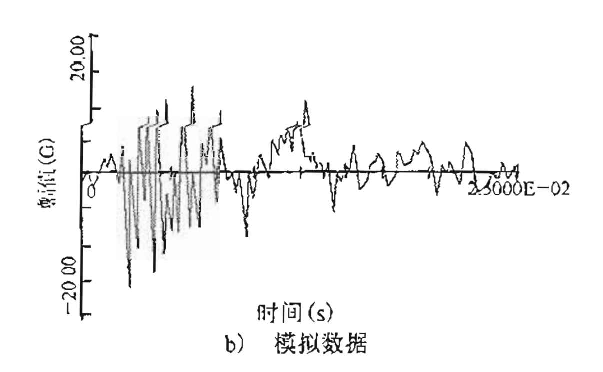
除测量环境与使用环境可比程度不确定以外，本程序还包括其他统计不确定性。本程序并不说明与使用环境多样性有关的不确定性。不能用本程序来确定炮击环境预计的误差。



图B.1　50发30mm炮击信号

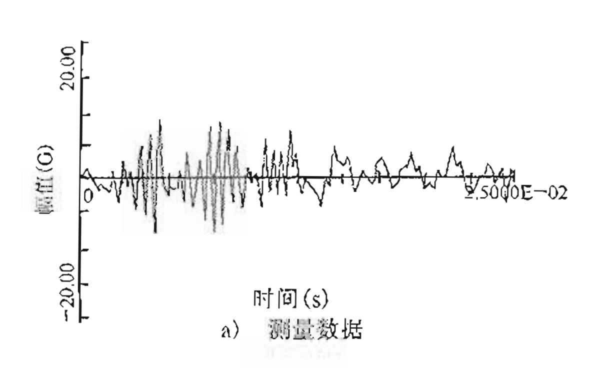


a) 测量数据

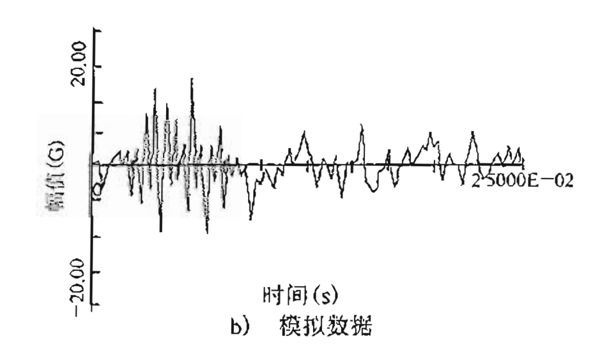


b) 模拟数据

图 B.2 总体样本时间历程脉冲(第 37 脉冲)

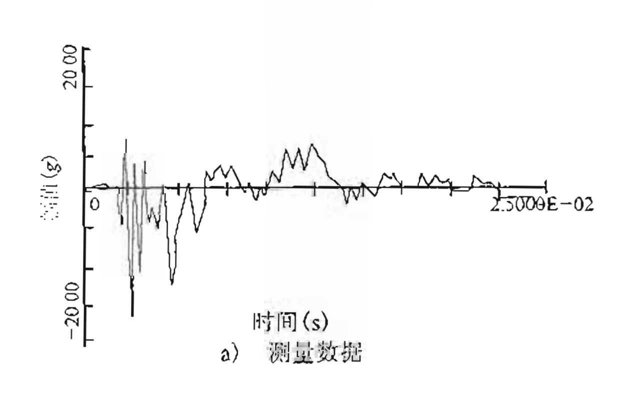


a) 测量数据

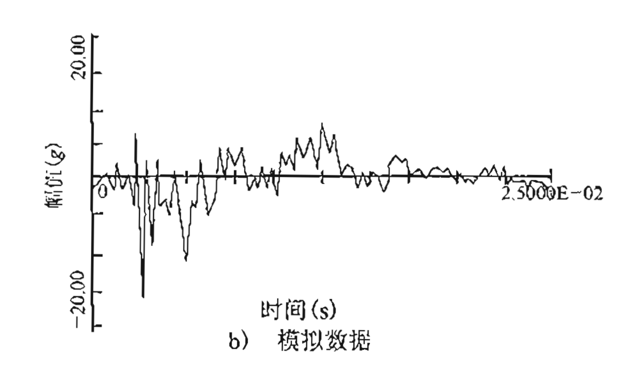


b) 模拟数据

图 B.3 总体残余样本时间历程脉冲(第 37 脉冲)

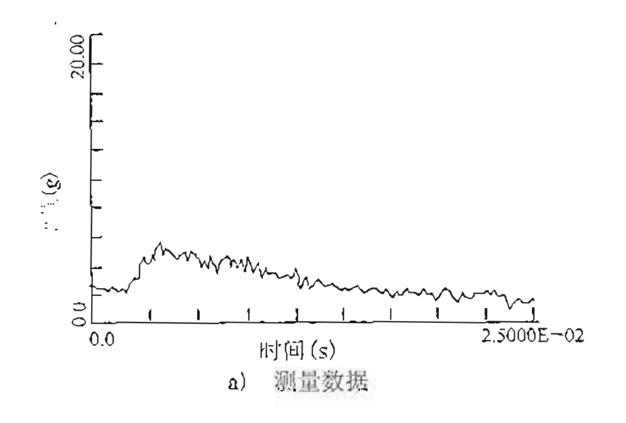


a) 测量数据

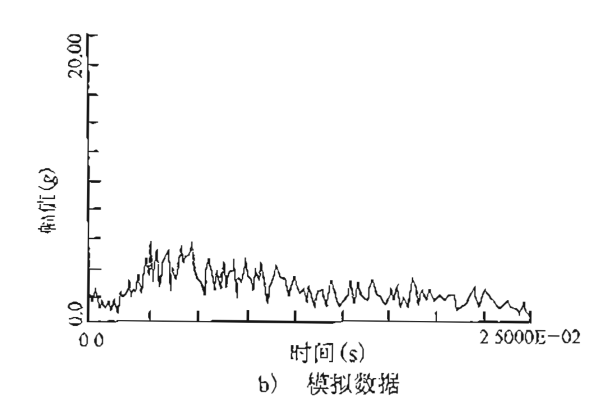


b) 模拟数据

图 B.4 总体时变均值估计

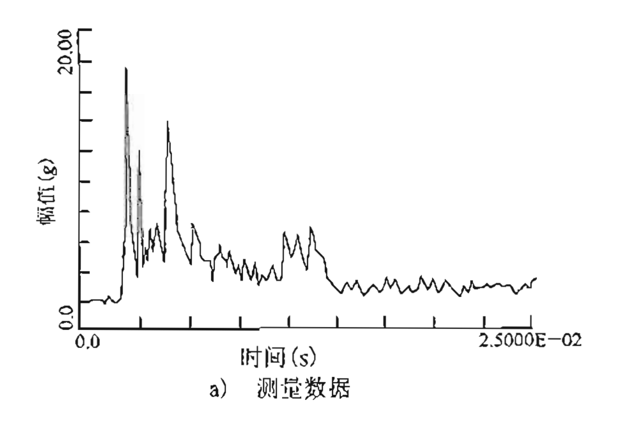


a) 测量数据

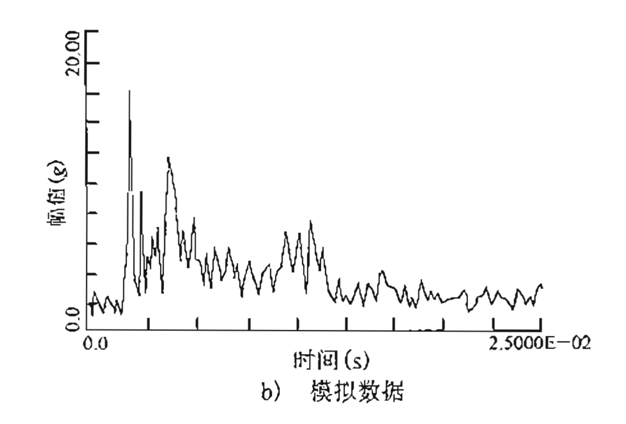


b) 模拟数据

图 B.5 总体时变标准差估计

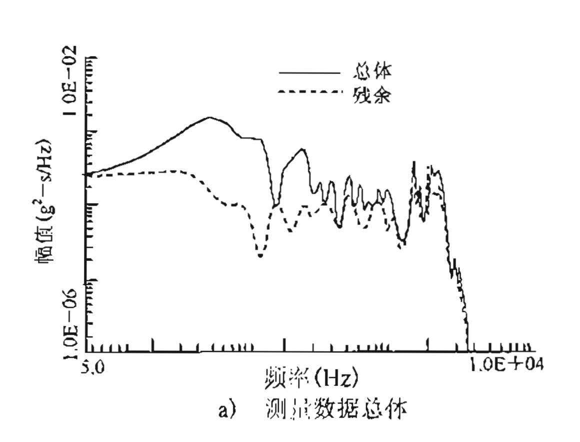


a) 测量数据

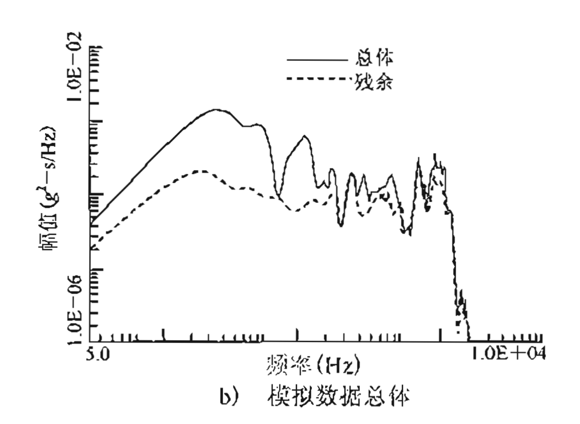


b) 模拟数据

图 B.6 总体时变均方根估计

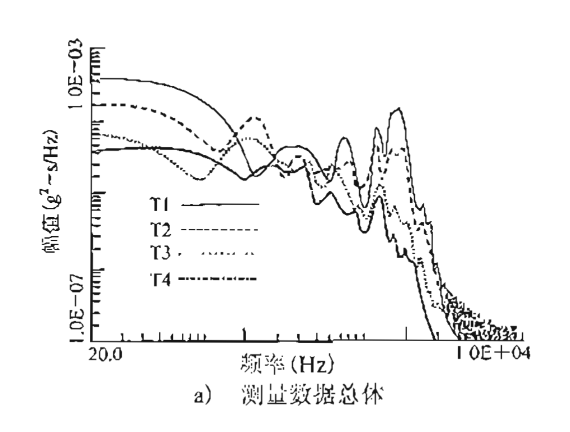


a) 测量数据总体

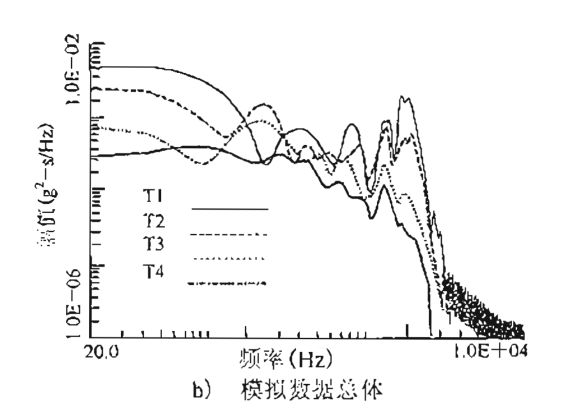


b) 模拟数据总体

图 B.7 能量谱密度函数估计

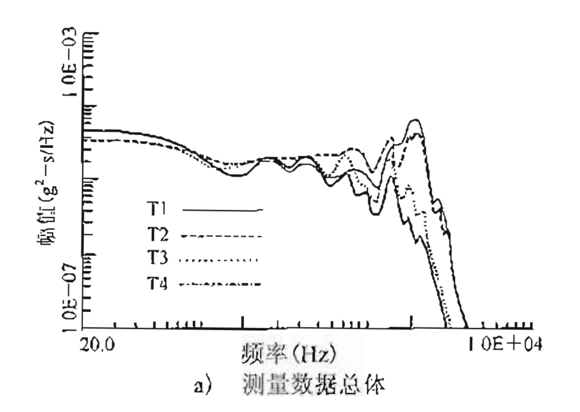


a) 测量数据总体

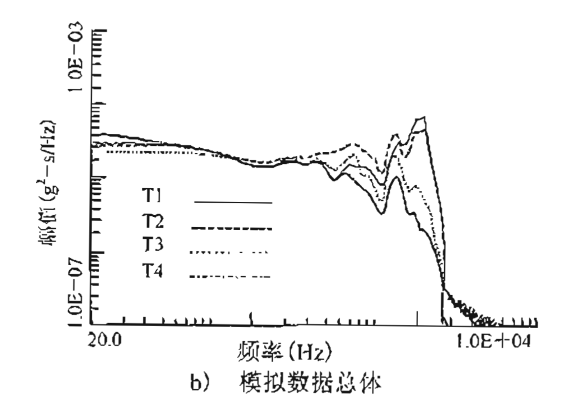


b) 模拟数据总体

图 B.8 短时能量谱密度函数估计(数据)

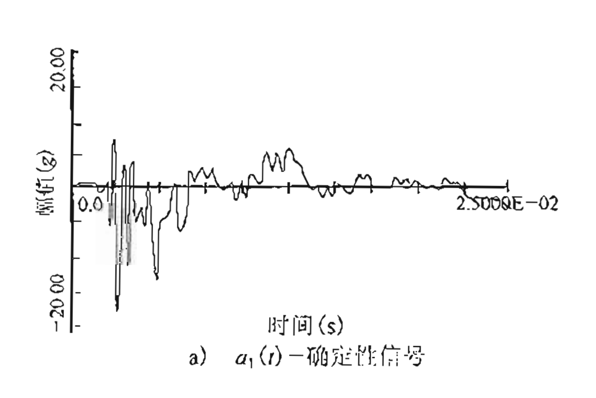


a） 测量数据总体

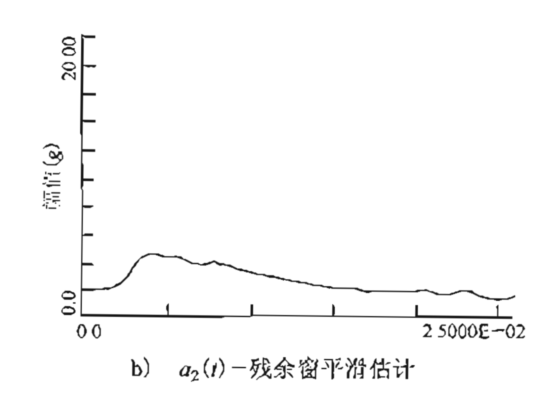


b） 模拟数据总体

图 B.9 短时能量谱密度函数估计(残余)

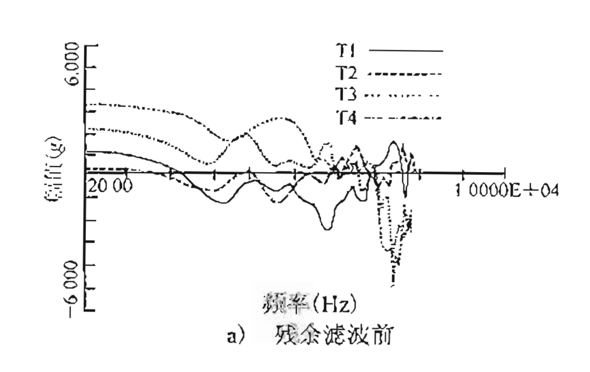


a） $a_1(t)$—确定性信号

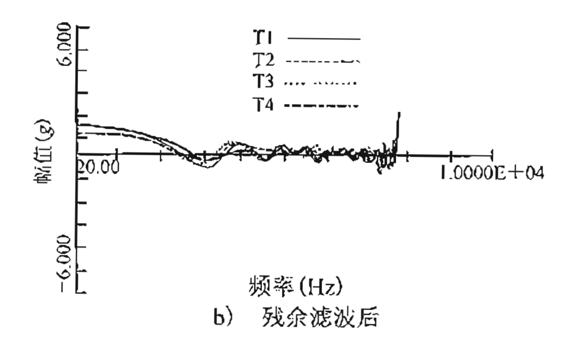


b） $a_2(t)$—残余窗平滑估计

图 B.10 非平稳模型确定性函数



a） 残余滤波前



b） 残余滤波后

图 B.11 分段 ESD 相对值

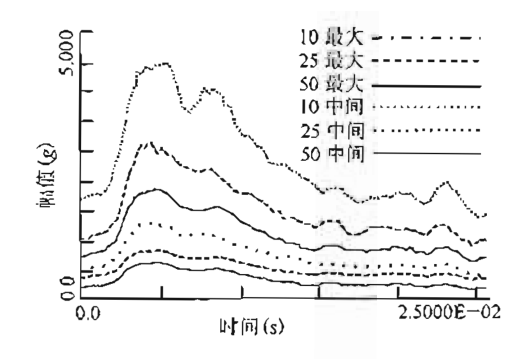


图 B.12 模拟总体样本量为 10、25 和 50 的时变均值平滑模拟根方差估计
(对应样本时间历程最大处与中间处)

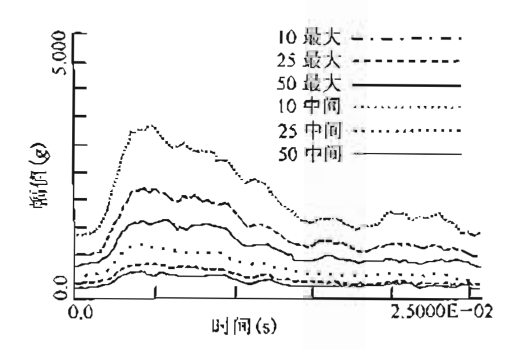


图 B.13 模拟总体样本量为 10、25 和 50 的时变标准差平滑模拟根方差估计
(对应样本时间历程最大处与中间处)

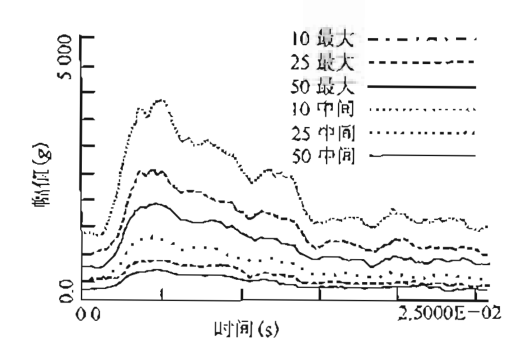


图 B.14 模拟总体样本量为 10、25 和 50 的时变均方根平滑模拟根方差估计
(对应样本时间历程最大处与中间处)

附　录　C
（规范性附录）
重复脉冲冲击响应谱(SRS)

C.1　范围

C.1.1　目的

本附录为炮击环境实测装备响应的试验室模拟提供技术指导。

C.1.2　应用

本方法用于从随机过程的单个样本函数来推导与之相对应的时变随机过程。该样本函数代表了单个炮击信号的特征。

C.2　推导过程

C.2.1　引言

C.2.1.1　本程序假定能将实测装备响应时间历程分解成一系列单个脉冲，并把它们当成一个脉冲总体。使用各种阻尼系数计算各个脉冲的最大SRS，得出各个脉冲的频率特征。同时，用每个阻尼系数计算脉冲总体的SRS均值，进一步分析装备响应的脉冲特征。根据从SRS得到的这些信息，就可采用调幅正弦成分或衰减正弦来合成加速度时间历程。随后将SRS时间作为炮击装备响应脉冲，以炮击速率输入给试件。

C.2.1.2　本程序的优点如下：

a)　利用了标准试验室冲击试验装备；
b)　能再现实测装备响应数据的频率特性；
c)　谱型简单，且能在各种试验设施上再现。

C.2.1.3　本程序的缺点如下：

a)　调幅正弦成分或衰减正弦产生的时间脉冲不太好控制，同时该脉冲形式可能与实测装备响应脉冲形式不相似；
b)　试验模拟中很少利用统计量；
c)　对于不具有SRS模式的振动台控制系统，以炮击速率再现脉冲系列可能会产生困难。

C.2.2　试件安装

用夹具把试件安装在振动台上，试件的安装状态应和实际使用时的状态一致。按照要求在试件上适当布置传感器，并且连接好各种测试仪器。

C.2.3　创建炮击环境装备响应振动的数字文件

用2kHz、48dB/Oct的低通线性相位抗混滤波器和每秒20480个样本的采样速率对装备实测响应数据进行数字化，得到如图C.1所示的加速度时间历程。

C.2.4　计算冲击响应谱

仔细检查各实测响应脉冲，若发现脉冲之间具有类似的特征，选择一个典型的脉冲进行分析。为了提高结果的统计置信度，可以在时间上对脉冲系列进行总体平均，然后将得到的总体均值作为代表性的脉冲。用按阻尼系数Q值分别为10、25、50和100计算该脉冲的SRS。若各脉冲的特征相差很大，则有必要根据有经验的分析人员的判断进行几次试验。

C.2.5　有代表性的炮击环境装备响应脉冲等效半周期内容的估计

由图C.2可知，该脉冲有7个优势频率，它们约为80Hz，280Hz，440Hz，600Hz，760Hz，1360Hz和1800Hz。因为恒幅正弦波形的($2Q$)半周期在给定Q值下提供大约95%的的最大幅值，对于组成实测炮击装备响应包含的优势频率的等效半周期内容的估计值可通过识别出Q值来确定，在Q为该值时，

SRS特定频率的峰值加速度开始稳定。图C.2中Q为10时描述了80Hz频率成分的半周期内容。除1800Hz以外，Q为25描述了其他优势频率的半周期内容，Q为50时描述了1800Hz频率成分的半周期内容。

C.2.6　有代表性的炮击环境装备响应脉冲SRS瞬态信号的产生

用数字式振动台控制系统产生SRS瞬态时间历程脉冲(根据专门的波形合成算法)。这个SRS瞬态时间历程脉冲由1/12 Oct的调幅正弦成分构成，大部分1/12 Oct成分受到振动台控制系统只允许最低3个半周期的限制。由于受到炮击响应脉冲25ms的持续时间(40Hz炮击速率)或C.2.5讨论的半周期估计技术的限制，7个优势频率被局限于半周期内容。等于10的Q值被确定用于80Hz的频率成分；而等于25的Q值用于180Hz，440Hz，600Hz，760Hz和1360Hz的频率成分；等于50的Q值用于1800Hz的频率成分。对于每个阻尼系数(Q=10，25，50和100)，在脉冲总体上计算SRS均值，以描述SRS幅值特性。随后选择使用等于50的分析Q值计算的SRS均值，来确定所模拟的装备响应脉冲每个频率成分处的SRS幅值。对于每个1/12 Oct调幅正弦成分，规定使用0延时。调幅正弦成分的精确值见表C.1，通过调幅正弦成分精确值产生的SRS炮击装备响应瞬态信号见图C.3。

C.2.7　炮击装备响应模拟

以炮击速率40Hz重复SRS响应瞬态信号。由于受到振动台控制系统输出脉冲速率的限制，40Hz的炮击速率是不能达到的。图C.4是加速度时间历程，它说明了当脉冲速率不受振动台控制器限制时，SRS炮击环境模拟的重复特征。若振动台控制系统没有这种快速重复的功能，则使用附录A中的试验程序。

C.3　推荐的程序

C.3.1　推荐的程序

对于相对简单的动态装备上的单点装备响应，当装备在炮击环境下工作时，保持功能和结构完整性非常重要，就使用本程序。

C.3.2　不确定因素

除测量环境与使用环境可比程度不确定以外，本程序不包括其他统计不确定性。

表C.1　SRS炮击装备响应脉冲调幅正弦波精确值

频率 Hz	幅值 g	半周期数	频率 Hz	幅值 g	半周期数
78.75	11.955	3	264.87	20.324	3
83.43	11.803	3	280.62	22.004	13
88.39	11.628	3	297.30	18.275	3
93.64	11.455	3	314.98	16.901	3
99.21	11.285	3	333.71	14.825	3
105.11	11.117	3	353.55	13.002	3
111.36	10.952	3	374.58	16.653	3
117.98	10.777	3	396.85	21.330	3
125.00	10.617	3	420.45	27.321	3
132.43	10.459	3	445.45	34.995	21
140.31	10.304	3	471.94	26.455	3
148.65	10.151	3	500.00	19.999	3
157.49	10.000	3	529.73	21.232	3
166.86	10.814	3	561.23	22.568	3
176.78	11.708	3	594.60	23.988	29
187.29	12.662	3	629.96	18.323	3
198.43	13.709	3	667.42	13.996	3
210.22	14.825	3	707.11	20.448	3
222.72	16.051	3	749.15	29.992	37
235.97	17.358	3	793.70	31.225	3
250.00	18.793	3	840.90	32.509	3

表 C.1(续)

频率 Hz	幅值 g	半周期数	频率 Hz	幅值 g	半周期数
890.90	33.845	3	1 414.21	37.325	3
943.87	35.237	3	1 498.31	31.010	3
1 000.00	36.728	3	1 587.40	50.003	3
1 059.46	38.238	3	1 681.79	80.631	3
1 122.46	39.811	3	1 781.80	130.017	89
1 189.21	41.448	3		124.882	
1 259.91	43.152	3	1 887.75	119.950	3
1 334.84	44.975	49	2 000.00		3

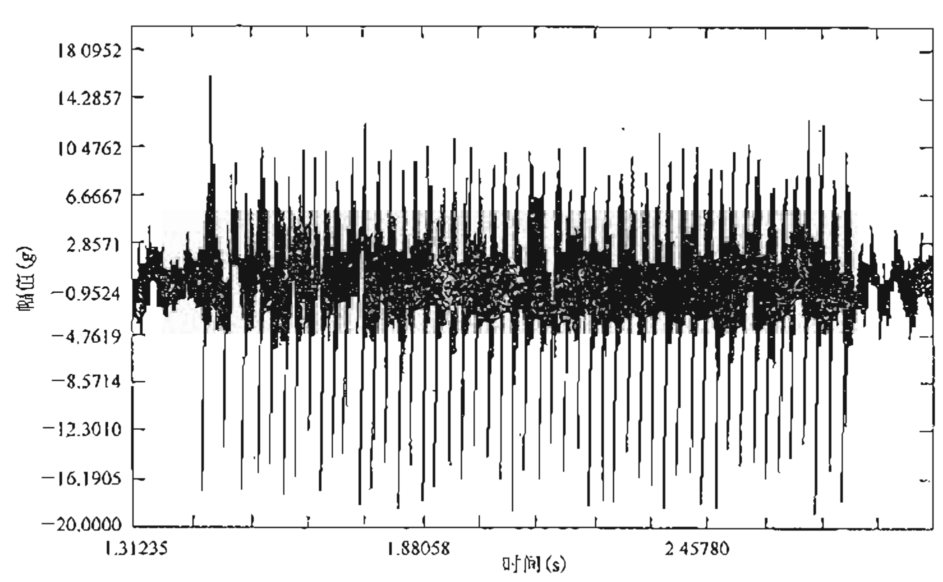


图 C.1 数字化的测量数据

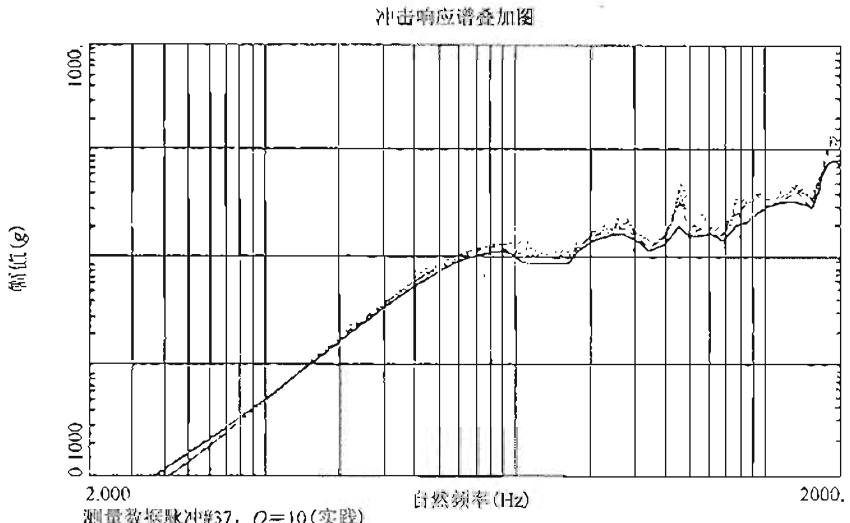


图 C.2 Q 值分别为 10，25，50，100 的代表性炮击脉冲比较

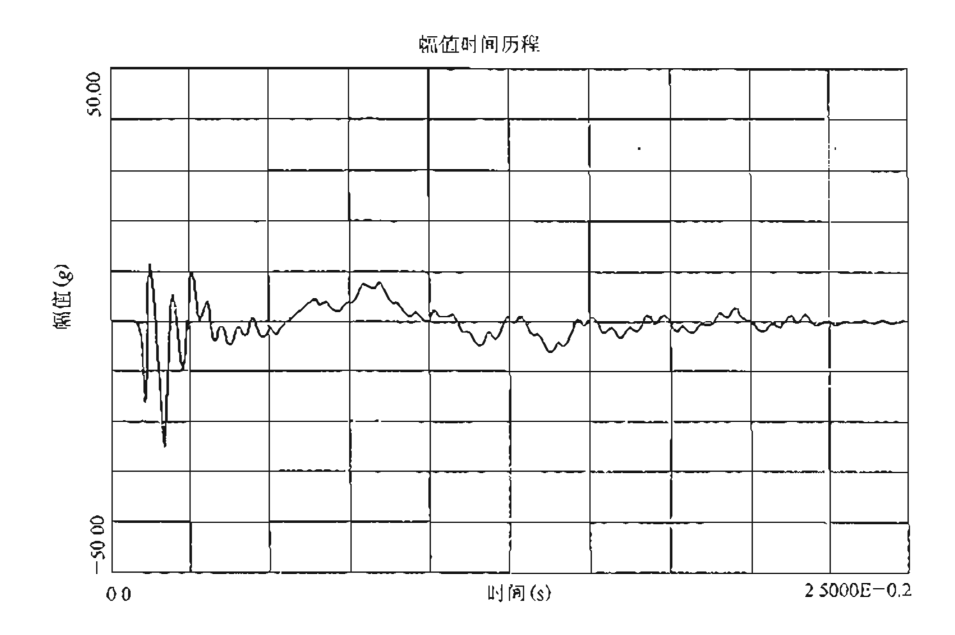


图 C.3　使用数字控制器产生 SRS 炮击脉冲

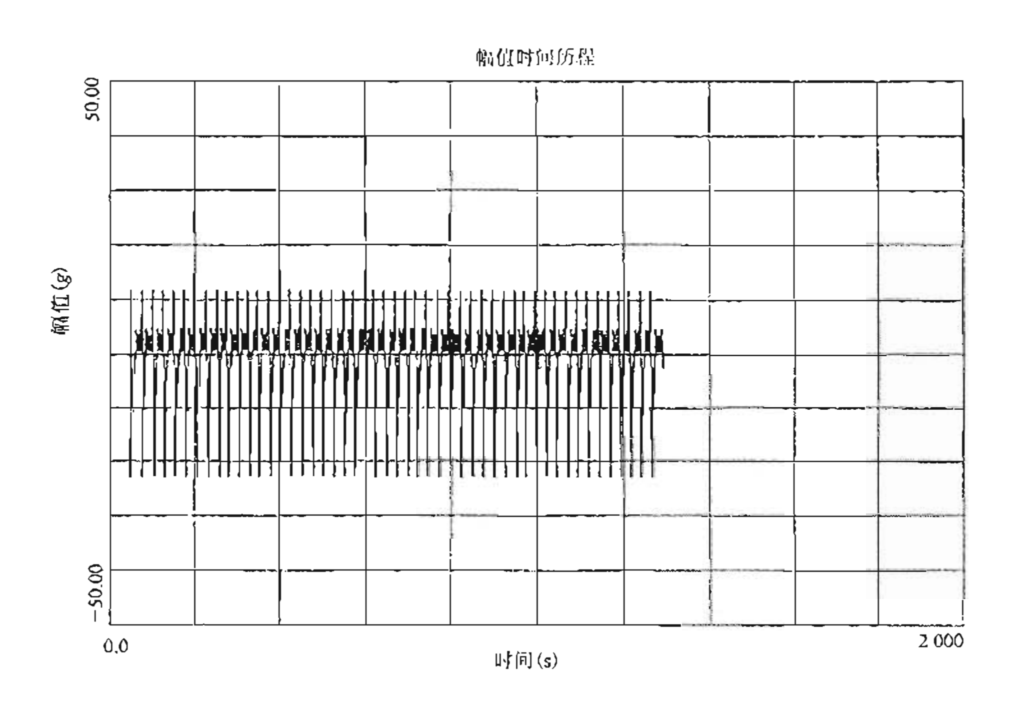


图 C.4　SRS 炮击脉冲模拟－分析脉冲串

附 录 D
（规范性附录）
高量值随机振动/正弦加随机振动/窄带随机加宽带随机振动

D.1 范围

D.1.1 目的

本附录提供了预估炮击振动（当无法得到实测数据时）的技术指导。

D.1.2 应用

本附录仅适用于飞机炮击和安装在带有机炮的飞机上的装备。本附录中的指南仅适用于当使用环境下实测装备响应数据得不到，或者不能在装备研制程序早期得到时。若能获得安装在使用平台上的装备响应的早期测量数据，就应该用该数据和其他试验程序之一预计的严酷度来代替利用本附录所提供的严酷度。若在使用环境下实测装备响应具有高量值宽带随机振动的特征，而且又不能应用程序 II 或程序 III 时，那么就使用程序 I，或者使装备经受一段时间的高量值宽带随机振动（其振动量级取实测数据的 ASD 估计）。

D.2 推导过程

D.2.1 引言

本程序与其他三个程序不同，它是在分析相对较少的实测装备炮击响应数据的基础上推导出来的。因此，它提供的装备振动响应将与特定装备的使用实测振动响应有很大的差异。一般情况下，不能对装备炮击响应进行精确预计。

D.2.2 预估炮击振动谱

炮击振动预估谱由平稳随机振动宽带谱迭加 4 个正弦离散谱构成。图 D.1 是通用的炮击振动谱。图中振动峰值的频率分别对应额定炮击速率及其前三阶谐波。图 D.1 中的每个参数的值能够依据表 D.1、表 D.2、表 D.3 以及图 D.2～图 D.8 来确定。图 D.1 谱形中宽带随机振动三个量级 T_j（单位 dB 指相对 $1g^2$/Hz 的大小）按式（D.1）的通用参数方程确定：

$$10\log_{10}(T_j)=1\log_{10}(NF_1E)+H+M+W+J+B_j-53\text{dB} \quad (j=1, 2, 3) \cdots\cdots (D.1)$$

式中各参数的含义如表 D.1。

图 D.1 谱形中离散（正弦）振动的四个量级 P_i（单位 dB 指相对 $1g^2$/Hz 的大小），按如下通用参数方程确定：

$$10\log_{10}(P_i)=10\log_{10}(T_3)+K_i+17\text{dB} \quad (i=1, 2, 3, 4) \cdots\cdots (D.2)$$

式中各参数的含义如表 D.1。

预估振动谱的关键是要确定以下 4 个几何参数：

a) 矢量距离（D）。如图 D.2 所示，矢量距离是从炮口到装备支撑点之间的平均距离。对于多门炮的配置，如图 D.3 所示，矢量距离的原点是指多门炮口的形心。图 D.7 和图 D.8 是随机谱和离散频谱随矢量距离 D 的衰减系数。

b) 炮的投影距离（h）。如图 D.4 所示，h 是指炮管与飞机表面的垂直距离。

c) 深度参数（R_s）。如图 D.2 所示，R_s 是指垂直于飞机蒙皮、到机内装备位置处的距离。若 R_s 未知，则取 R_s=7.6cm。图 D.6 是 R_s 的谱衰减系数。

d) 炮径（c）。表 D.3 确定了炮径参数 c，单位为 mm 和 in。

若有实测装备响应数据，那么就在这些数据的基础上确定振动峰带宽；当没有实测数据时，振动峰带宽按式（D.3）确定：

$$BW_{3\text{dB}}(\pi F^{1/2})/4 \cdots\cdots (D.3)$$

式中：

BW_{3dB} —— 在 ASD 峰值量下降 3dB 处的带宽；

F —— 基频或谐波频率 F_1、F_2、F_3 或 F_4 之一。

在研制过程中，炮击速率可能有变化，或者火炮以一个扫描速率开火。对于上述情况有两种处理方法：一是，在基频和每个谐频的带宽内进行正弦扫描；二是，如果扫描频率带宽不太大，使用窄带随机振动。在附属结构或装备响应出现明显非线性时，该方法可能在那些频率上过估计。而当附属结构或装备共振频率与炮击环境频率一致时，装备振动响应可能会欠估计。

D.2.3　试验持续时间

三个轴向的每个方向上的试验持续时间为装备在实际使用中经受该环境的总时间。保守估计的持续时间为每次飞行时炮击最长的持续时间乘预期炮击项目的飞行起落数。而炮击的飞行起落数与飞机计划训练和战斗利用率有关，一般在 200 到 300 次左右。每次飞行最长的炮击时间等于每架飞机炮弹的总载量除以该飞机的炮击速率（见表 D.2）。当一门炮有多种炮击速率时，应按多种炮击速率进行试验，每一种炮击速率对应的试验时间应依据每种炮击速率预期在使用中所占时间的比例确定。飞机炮击通常是一组持续时间只有几秒的短脉冲。炮击环境试验应该符合实际使用情况。例如：施加 2s 的振动接着停止 8s，在这 8s 期间不施加振动。重复这种振动 2s/停止 8s 的循环直到等于该飞机使用中所确定的总振动时间为止。

D.2.4　谱产生技术

炮击振动的特征是在宽带随机振动上迭加 4 个振动尖峰，这些尖峰是机炮炮击速率的基频和前三阶谐频。现有振动控制系统软件包一般都提供了正弦加随机谱形式来进行炮击振动试验的方法。有时规定的炮击谱需要的动态范围超过了一些现有的振动控制器的能力。解决这个问题的一个方法是，将所希望的宽带随机谱及其强振动峰值送入到振动控制器中。在那些有很强振动峰值的频率上，通过电子手段将正弦波加入到振动台的功放输入上去。确保这些正弦波的幅值，使得在那些频率产生的振动量级略低于所要求的谱量级。振动控制器可以将其最终调整到需要的试验量级。该技术可用通常的试验设备和控制系统软件以闭环方法来进行炮击振动试验。

D.3　推荐的程序

D.3.1　推荐的程序

对于飞机炮击环境，没有实测数据时，使用本程序及其预计方法。对于有实测数据而且能证明其只存在高量级宽带随机振动而不存在“离散”成分的炮击环境，也可使用本程序。

D.3.2　不确定因素

因为炮击环境对火炮参数和几何结构很敏感，本程序中给出的量级有很大的不确定性。为了增加试验的保守程度，可以适当增加试验量级或持续时间，但必须提供合理和支撑性的评估文件。因为预计的极端振动量级可能与实测数据相差很大，那么潜在损伤的不确定性将随着预计谱量级的增加而大大增加，即使用本程序进行试验可能相当不保守。

表 D.1 炮击诱导振动建议的通用参数方程

$10\log_{10}(T_j)=10\log_{10}(NF_1E)+H+M+W+J+B_j-53\text{dB}$
$10\log_{10}(P_i)=10\log_{10}(T_3)+K_i+17\text{dB}$
式中： T_j —— 试验量级，g^2/Hz。 N —— 相距很近的同时射击的炮的最大数目。对于分散在机体上的各门炮，如在翼根和在炮舱中，应根据每门炮的位置单独确定振动试验谱。根据试验目的，选择按产生最大振动量级的炮来确定试验振动量级。 F_1 —— 炮击频率($F_2=2F_1$，$F_3=3F_1$，$F_4=4F_1$)，Hz。 E —— 炮的爆炸能(见表 D.3)。 H —— 炮投影距离的影响(见图 D.4)。 M —— 炮位置的影响。在位于炮口垂直于炮管轴向的平面不与飞机结构相交的情况下，$M=-6$dB；其他情况下 $M=0$。 W —— 被试装备重量的影响(见图 D.5)，若装备重量未知，取 $W=4.5$kg。 J —— 装备位置和飞行器蒙皮相对空间的影响(见图 D.2 和图 D.6)。 B_j —— 从炮口到装备位置矢量距离的影响(见图 D.7)。 P_i —— 频率 F_i 处的试验量级，g^2/Hz(式中 $i=1\sim4$)。 K_i —— 在每个振动峰值 P_i 上的矢量距离的影响(见图 D.8)。 注：dB 值是相对于 $1g^2$/Hz 的。

表 D.2 与各类飞机有关的典型机炮配置

飞机/炮舱	炮(数量)	位置	炮击速率		炮弹装载量
			发/分	发/秒	
A-4	MK12(2)	翼根	1000	16.6	100/每门炮
A-7D	M61A1(1)	头部、左边	4000 和 6000	66.6 和 100	1020
A-10	GAU-8/A(1)	头部	2100 和 4200	35 和 70	1175
A-37	GAU-2B/A(1)	头部	6000	100	1500
F-4	M61A1(1)	头部	4000 和 6000	66.6 和 100	638
F-5E	M39(2)	头部	3000	50	300/每门炮
F-5F	M39(1)	头部	3000	50	140
F-14	M61A1(1)	头部的左侧	4000 和 6000	66.6 和 100	676
F-15	M61A1(1)	右翼根	4000 和 6000	66.6 和 100	940
F-16	M61A1(1)	左翼根	6000	100	510
F-18	M61A1(1)	机头顶部中央	4000 和 6000	66.6 和 100	570
F-111	M61A1(1)	机身下侧	5000	83.3	2 084
GEPOD 30	GE430(1) (GAU-8/A)	POD	2400	40	350
SUU-11/A	GAU-2B/A(1)	POD	3000 和 6000	50 和 100	1500
SUU-12/A	AN-M3(1)	POD	1200	19	750
SUU-16/A	M61A1(1)	POD	6000	100	1200
SUU-23/A	GAU-4/A(1)	POD	6000	100	1200

表 D.3　炮的技术规格

炮	炮径		爆炸能，E J
	mm	in	
GAU−2B/A	7.62	0.30	6 700
GAU−4/A	20	0.79	74 600
GAU−8/A	30	1.18	307 500
AN−M3	12.7	0.50	26 000
M3	20	0.79	83 000
M24	20	0.79	80 500
M39	20	0.79	74 600
M61A1	20	0.79	74 600
MK11	20	0.79	86 500
MK12	20	0.79	86 500

注：E 也可以按如下公式计算：

$$E=\frac{KW_c g}{0.3}-\frac{mv^2}{2}$$

式中：

E ——爆炸能，J；

K ——爆炸比冲量，m·kg/kg；

W_c ——装药质量，kg；

m ——弹丸质量，kg；

v ——弹丸初速度，m/s；

g ——重力加速度，m/s²。

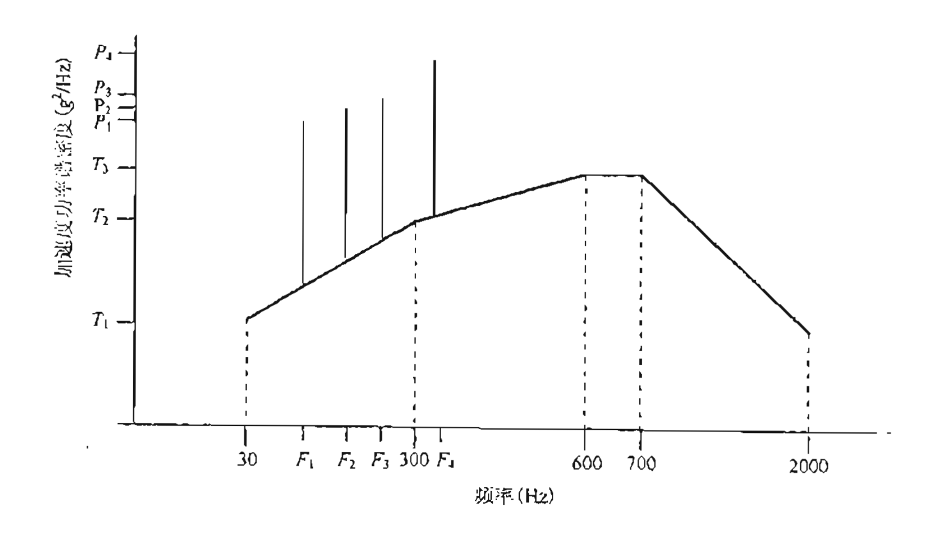


图 D.1　通用的炮击诱发振动谱

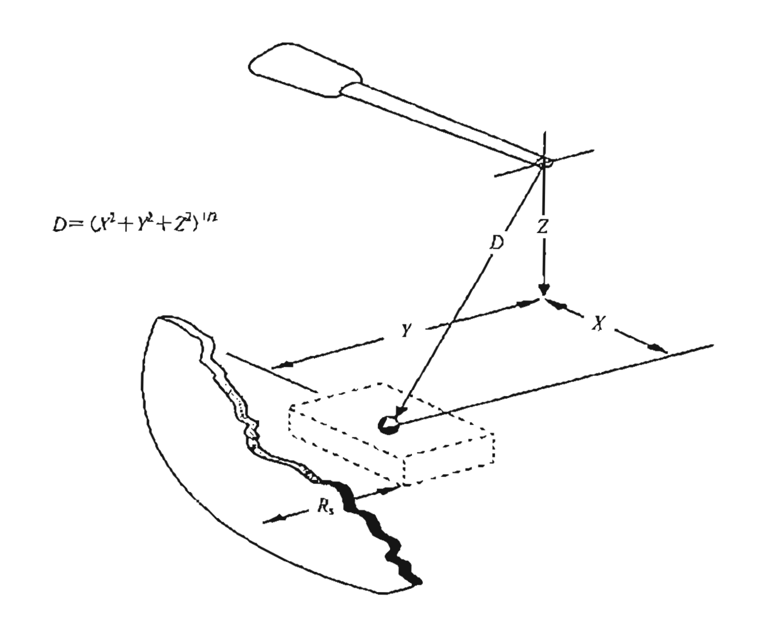


图 D.2　距离矢量(D)和深度参数(Rs)

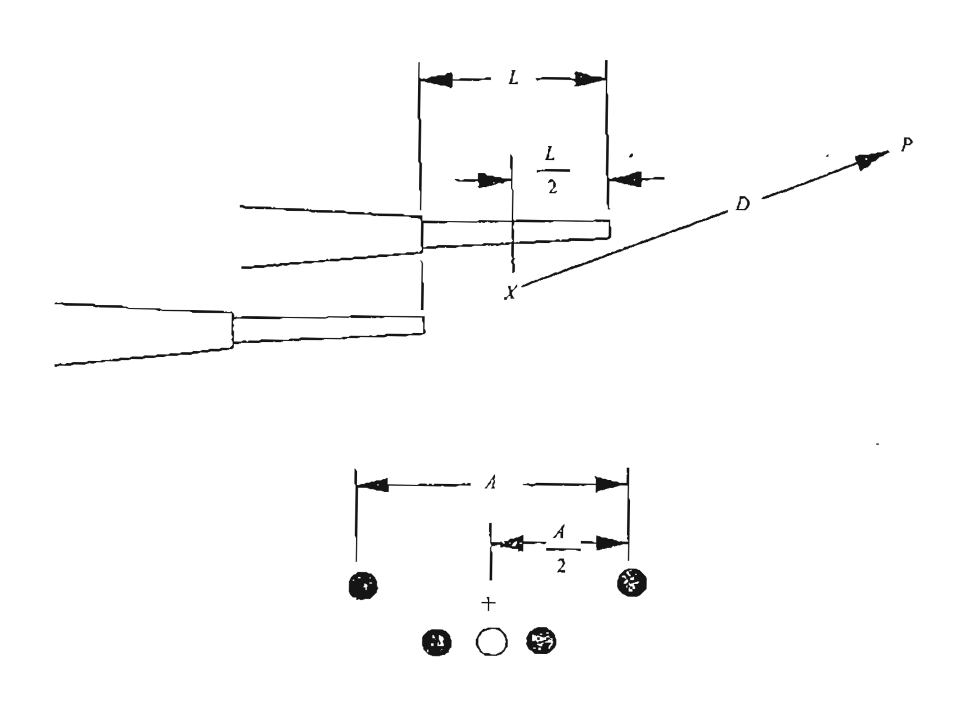


图 D.3　近距配置的多门炮

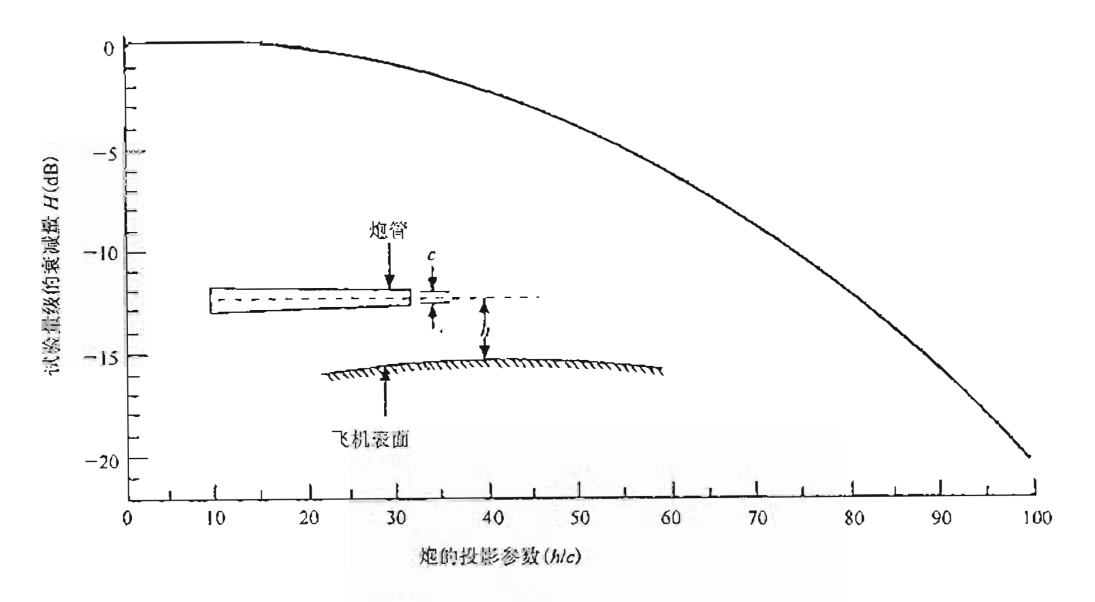


图 D.4　由炮的投影参数导致试验量级的衰减量

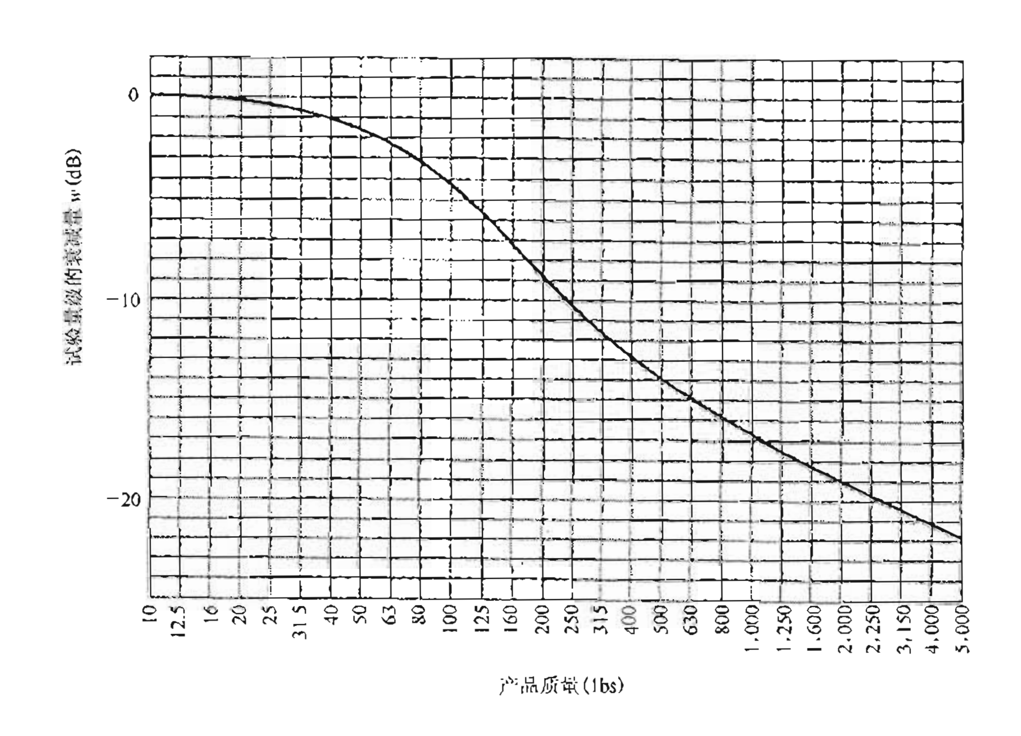


图 D.5　由装备质量引起的试验量级衰减量

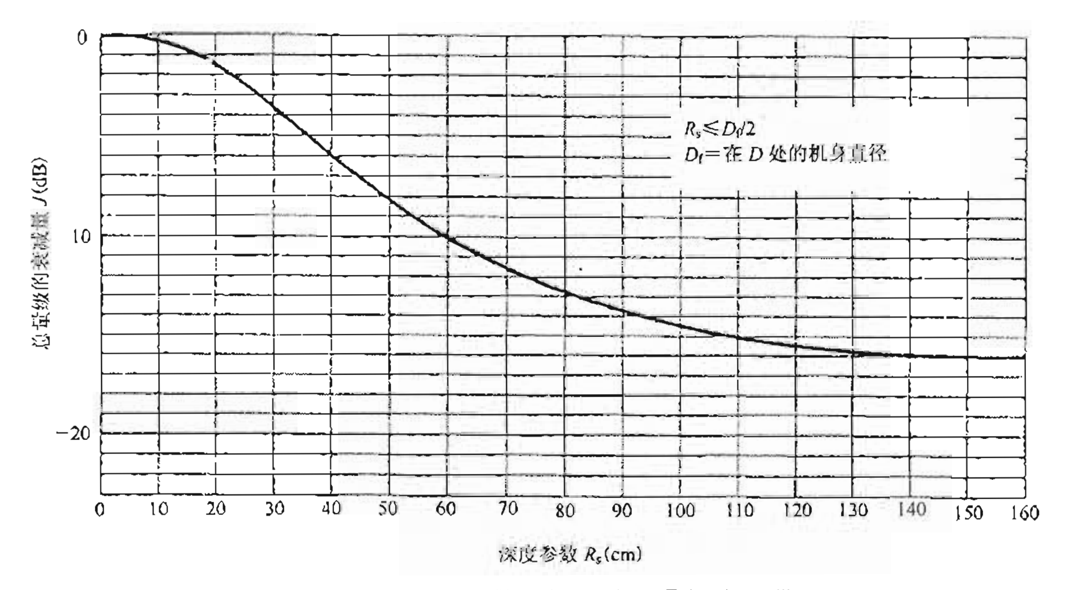


图 D.6　由深度参数引起的试验量级衰减量

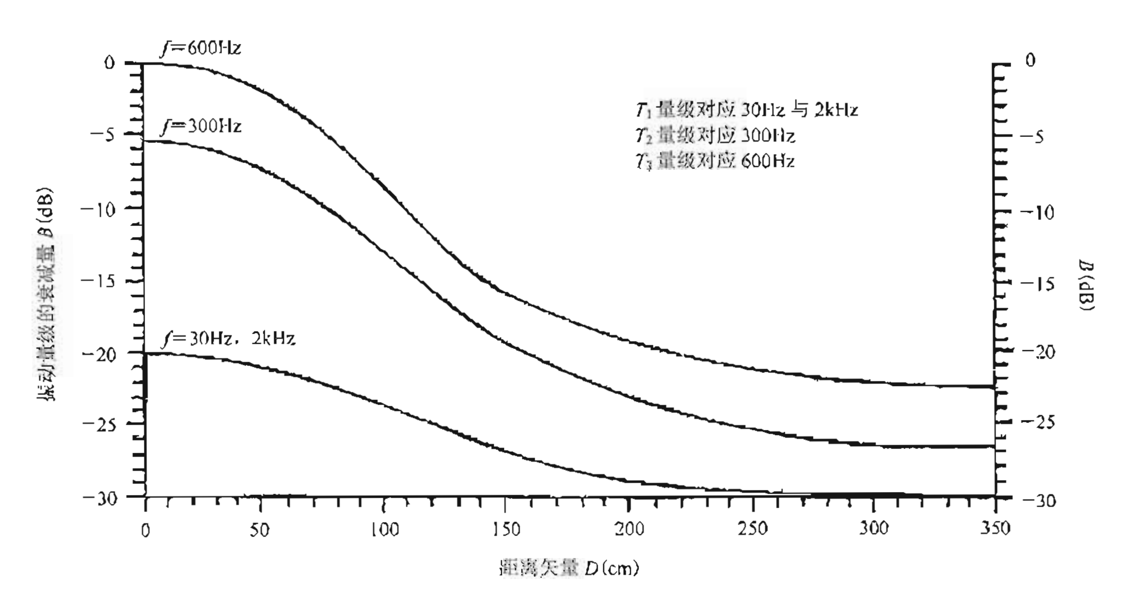


图 D.7　炮口距离矢量的增加引起振动量级的衰减量

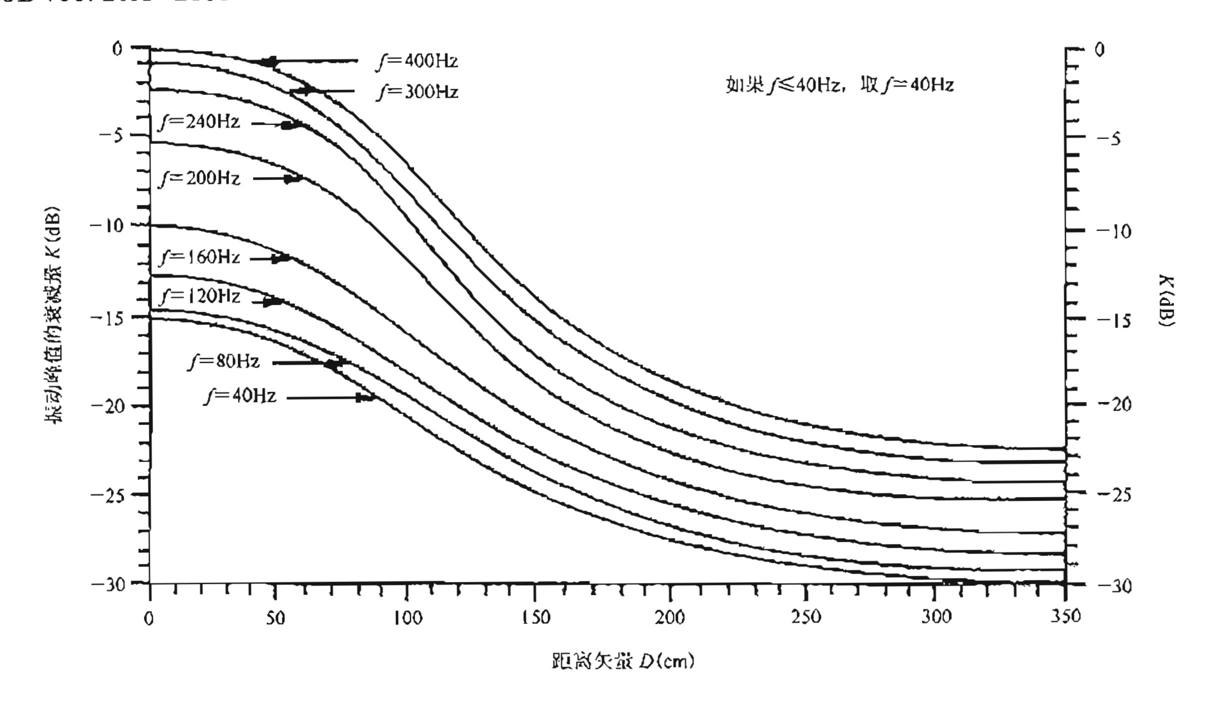


图 D.8　炮击振动峰值随矢量距离的增加引起的衰减量